

Amélioration des propriétés mécaniques des métaux

Chapitre 6



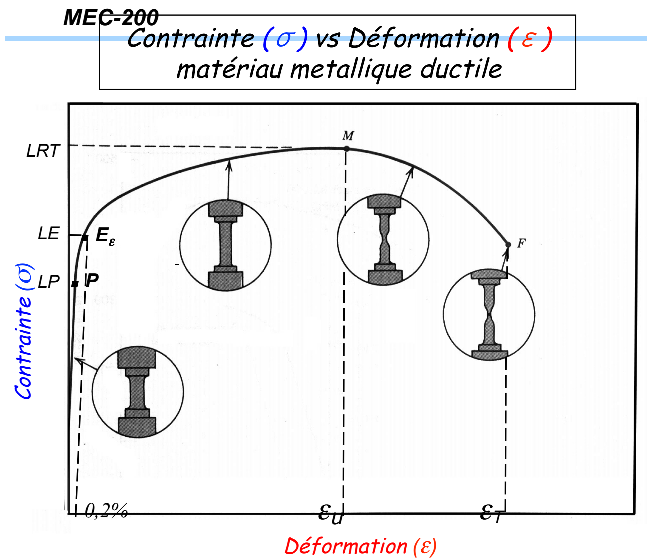
Avant d'augmenter les cotes d'une pièce, pensons à améliorer les propriétés du matériau!

Quelles sont les propriétés des matériaux qui peuvent être modifiées?

- E ?
- α ?
- ρ ?
- R_e ?
- R_m ?
- A % ?

Rappels : déformation plastique

Contrainte (σ) vs Déformation (ε)
matériau metallique ductile



$\sigma = F / A_o$

$\varepsilon = (l - l_o) / l_o = \Delta l / l_o$

A_o : section transversale
F : force appliquée
l : longueur échantillon déformé
l_o : longueur initiale

- O- P déformation élastique réversible
- P à F déformation plastique permanente
  - De P à M homogène
  - de M à F striction
- F : Rupture

- Tension au point E_ε : Limite d´élasticité ($R_{e0,2}$).
- Tension au point M : Résistance à traction (R_m).

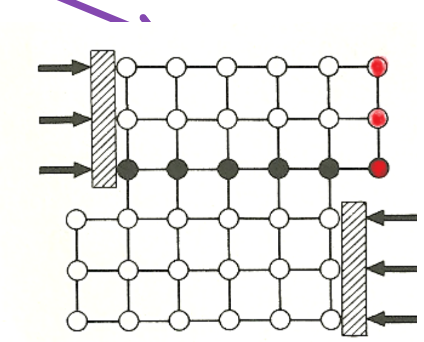
Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



MEC-200

La déformation plastique se fait par
déplacement des dislocations.

Dislocation coin



Sous l´action de la cission, la dislocation bouge progressivement dans le crystal.
Si le déplacement des dislocations est difficulté, le matériau deviendra plus dur.

Source: *Science et Génie des Matériaux W.D. Callister*



Mécanismes de durcissement

MEC-200

La déformation plastique = déplacement d'un grand nombre de dislocations

Déplacement des dislocations ⇔ propriétés mécaniques des matériaux

Réduction de la capacité de déplacer les dislocations → *Résistance mécanique accrue (plus grande force pour amorcer une déformation plastique)*

Résumé :

Procédés de durcissement (augmentation des propriétés mécaniques : dureté, résistance…) → *Principe* → *Restriction ou entrave au mouvement des dislocations*



Contenu

- Métaux, alliages et acier : durcissement par :
  1) Solution solide,
  2) Affinement du grain,
  3) Écrouissage,
  4) Durcissement structural,
  5) Traitement thermique des aciers.



1) Durcissement par solution solide

Un alliage monophasé a des propriétés supérieures à celle du solvant pur.



Solution solide ?

MEC-200

Définition

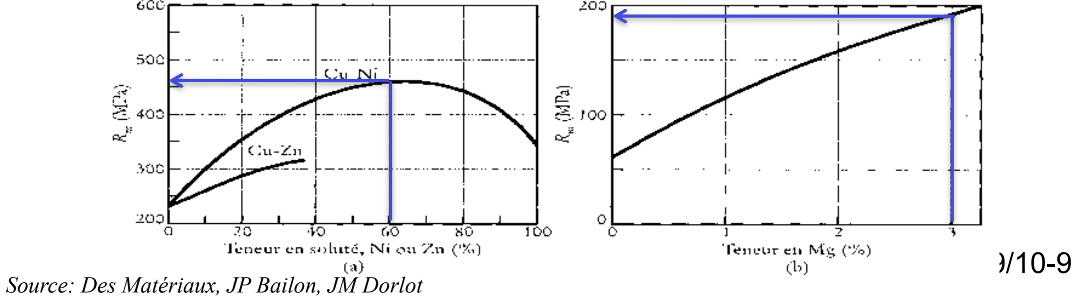
La notion de solution solide est une notion thermodynamique. C'est un mélange de corps purs formant un solide homogène.

Conséquences

Propriétés mécaniques améliorées.

Exemples :

- *Alliage Cu-Ni (60 % de Ni) => R_m 2x plus important que Cu*
- *3 % de Mg dans l'aluminium => R_m multipliée par 3 (faible quantité)*
- *Nickel, soluble dans la ferrite, accroît la limite d'élasticité, la résistance à la traction, sans que leur allongement à la rupture et leur ténacité ne soient diminués. 1 % de Nickel augmente résistance de 30 MPa.*



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Rôle des défauts

MEC-200

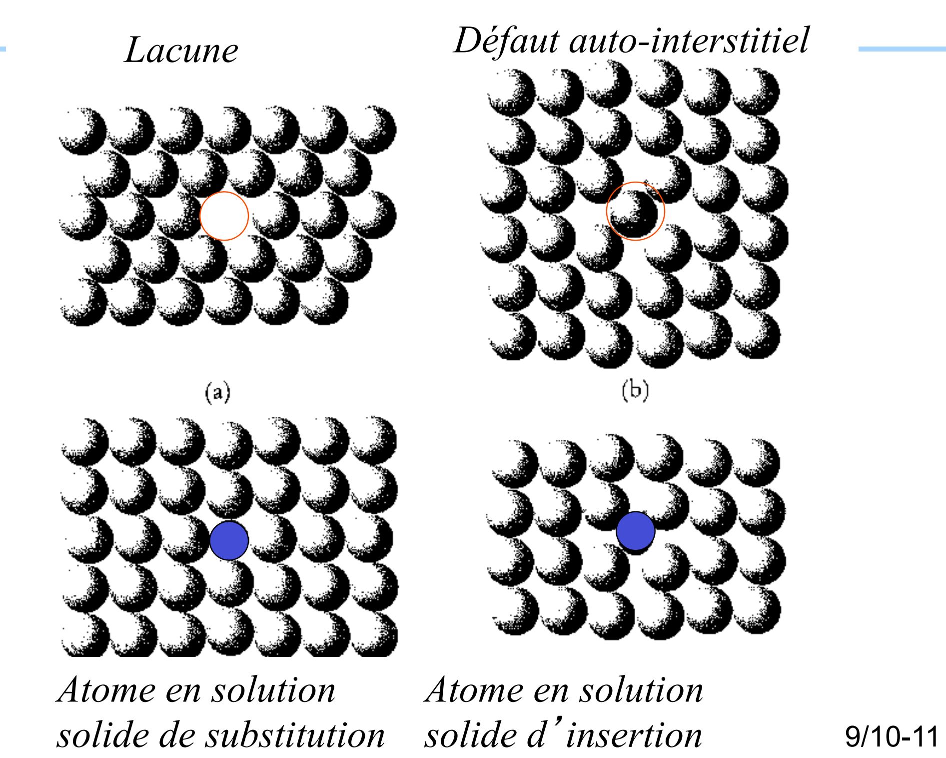
Dimensions	Type	Concentration ou dimension caractéristique	Influence
0			
1			
2			
3			

* θ_f – température de fusion ; θ_a – température ambiante (20 °C).



Durcissement par solution solide

MEC-200





Solution solide ?

MEC-200

Définition

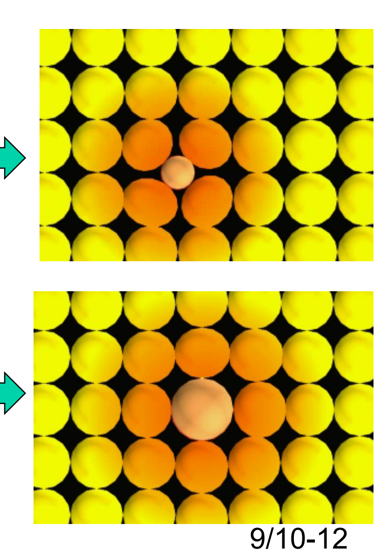
Les atomes en solution solide peuvent prendre plusieurs espaces :

- ***Solution solide d'insertion***

Atome d'insertion occupe un des sites libres définis par le réseau cristallins (sites octaédrique, tétraédrique, voir chapitre 3). Il faut alors que l'atome d'insertion ait un diamètre suffisamment petit pour s'insérer dans ces sites.

- ***Solution solide de substitution***

Atome de substitution occupe un des nœuds du réseau à la place de l'élément de base. C'est le cas quand l'atome de substitution est trop gros pour entrer dans les sites interstitiels.



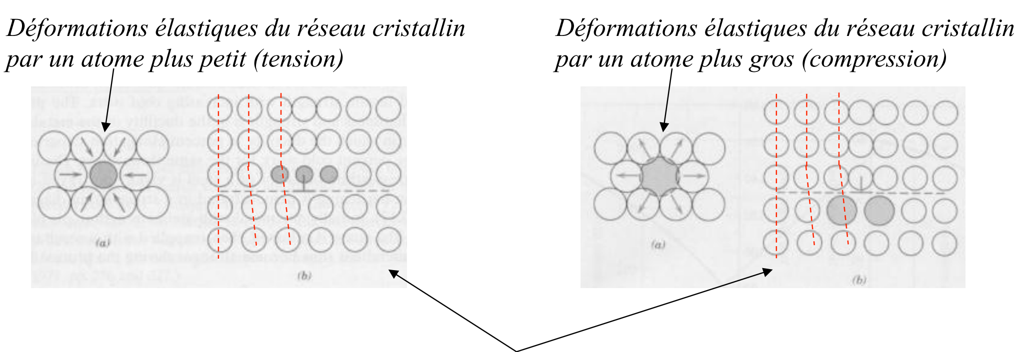


MEC-200

Mécanisme de durcissement

Déformations élastiques du réseau cristallin par un atome plus petit (tension)

Déformations élastiques du réseau cristallin par un atome plus gros (compression)



Endroit préférentiel des atomes étrangers (solutés)

(« annulation » des énergies de déformation dislocation-soluté)

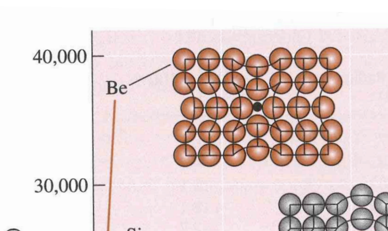
1) Augmentation de la résistance, car la dislocation est en quelque sorte brisée par l'annulation de la déformation locale.
2) Les champs de contrainte créés par les solutés gênent le mouvement des dislocations.

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



MEC-200

Mécanisme de durcissement



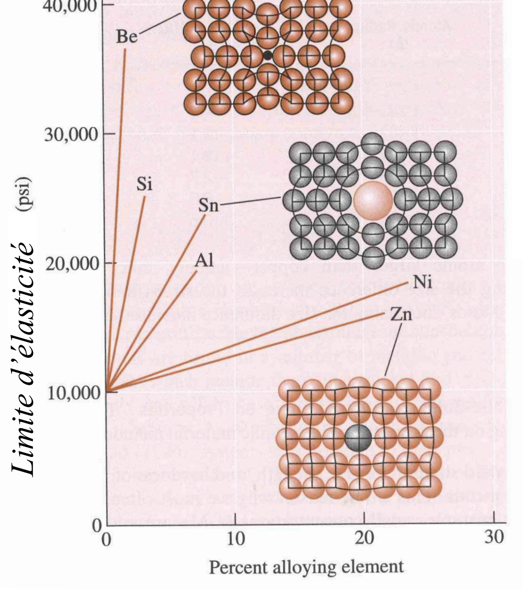


Figure 10-7

Effet de différents Éléments d'alliage dans Le cuivre

Metal	Atomic Radius (Å)	$\left[\frac{r - r_{Cu}}{r_{Cu}}\right] \times 100\%$
Cu	1.278	0
Zn	1.332	+4.2
Al	1.432	+12.1
Sn	1.509	+18.1
Ni	1.243	−2.7
Si	1.176	−8.0
Be	1.143	−10.6

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Mécanisme de durcissement

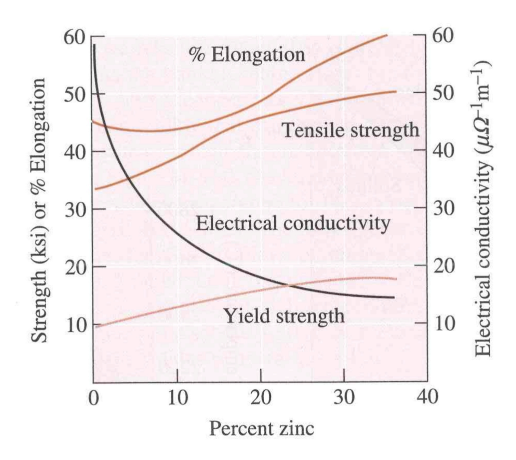


Figure 10-8

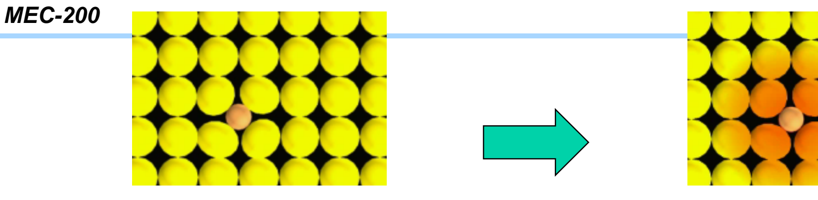
Effet de l'addition de Zn
Dans du cuivre sur ses propriétés

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



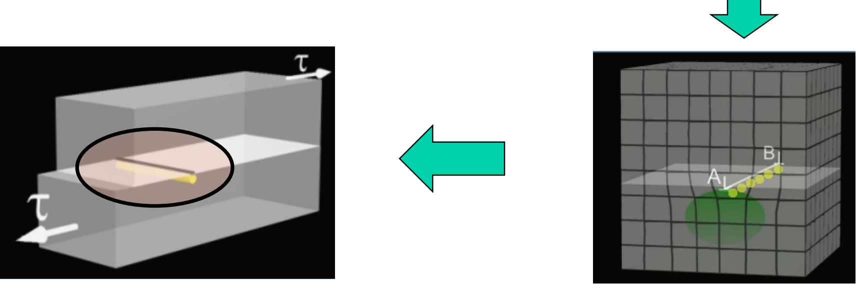
MEC-200

Mécanisme de durcissement



Formation d'une solution solide (atomes en sites interstitiels)

Distorsion élastique du réseau (atomes en insertion + gros que le site)



Pour diminuer l'énergie de distorsion élastique => atomes d'insertion le long d'une dislocation (formation d'un nuage de Cottrell)

La dislocation est plus difficile à mettre en mouvement => contrainte plus élevée pour les mettre en mouvement

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

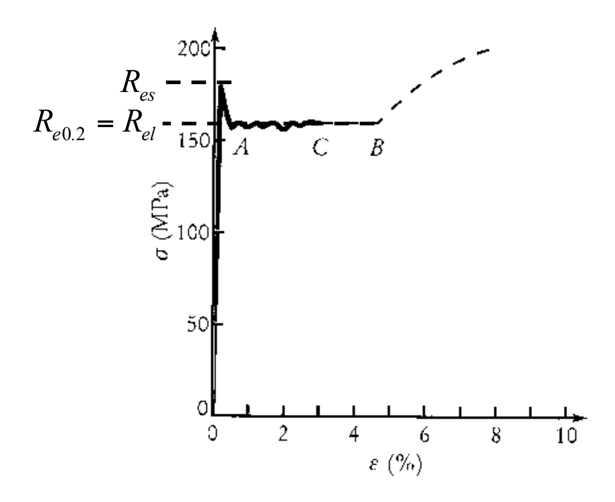
Conséquences sur la courbe de traction

Les dislocations sont libérées du nuages d'atome d'insertion (nuage de Cottrell) => formation d'une bande de Piobert-Lüders. Contrainte plus élevée pour mettre les dislocations en mouvement ($R_{es} > R_{el}$).

Propagation des bandes de Piobert-Lüders qui envahissent d'éprouvette à contrainte constante R_{el} (A => B).

Quand les bandes ont envahi la section utile => déformation homogène se poursuit (après B).

Attention : déformations non uniformes peuvent créer des « peaux d'orange » lors de l'emboutissage de certains métaux.





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Rôle des défauts

Dimensions	Type	Concentration ou dimension caractéristique	Influence
0	Lacunes	Concentration : $\simeq 10^{-4}$ à θ_f* $\simeq 10^{-15}$ à θ_a*	Diffusion à l'état solide
	Défauts autointerstitiels	Concentration : $\sim 10^{-16}$ à θ_f $\sim 10^{-35}$ à θ_a	
	Atomes étrangers		Propriétés mécaniques ; conductibilité électrique des isolants et des semi-conducteurs
	Défauts de Frenkel et de Schottky		
1	Dislocations		
2	Macles ; joints de grains	Taille des grains : de 1 μm à 1 cm	Ductilité ; propriétés mécaniques
3	Précipités		

* θ_f – température de fusion ; θ_a – température ambiante (20 °C).



2) Durcissement par diminution de la taille des grains



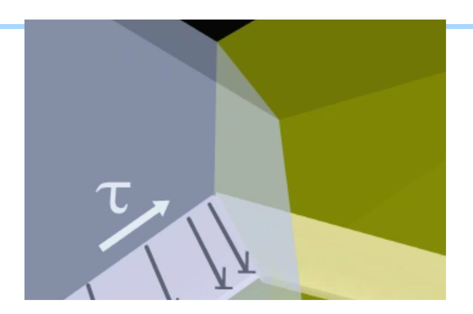
Re et Rm ↗

A % →

Ténacité améliorée car TTDF plus basse



Influence de la taille des grains



Joints de grain = obstacle au mouvement des dislocations => accumulation aux joints de grain (cas le plus fréquemment rencontré)

Plus les grains sont fins et plus la surface des joints de grain par unité de volume est importante, et donc les dislocations seront bloquées

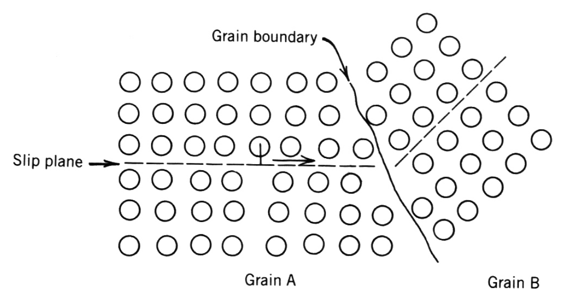
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Influence de la taille des grains

MEC-200

- Les joints de grains sont des obstacles au déplacement des dislocations.



Interaction du mouvement d´une dislocation avec un joint de grain.

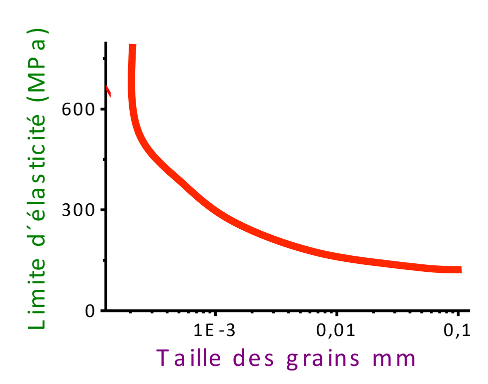
Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



Influence de la taille des grains

MEC-200

Influence de la taille du grain sur limite d´élasticité pour le laiton 70 % Cu – 30 % Zn



- *Petits grains : beaucoup de joints de grains, plus difficile le mouvement des dislocations, plus la limite d´élasticité élevée.*

Relation de Hall-Petch

$$R_{e0,2}=\sigma_o+kd^{-1/2}$$

où $R_{e0,2}$ est la limite d´élasticité
d : diamètre moyen du grain
σ_o et k sont des constantes

- La taille du grain est controlée par
  - La vitesse de solidification,
  - Le traitement thermomécanique.
- Donc par traitement thermomécanique, il est possible de controler les propriétés mécaniques.



Relation de Hall-Petch

MEC-200

Le diamètre des grains affecte les valeurs de R_e et R_m => relation de Hall Petch

$$R_{e0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

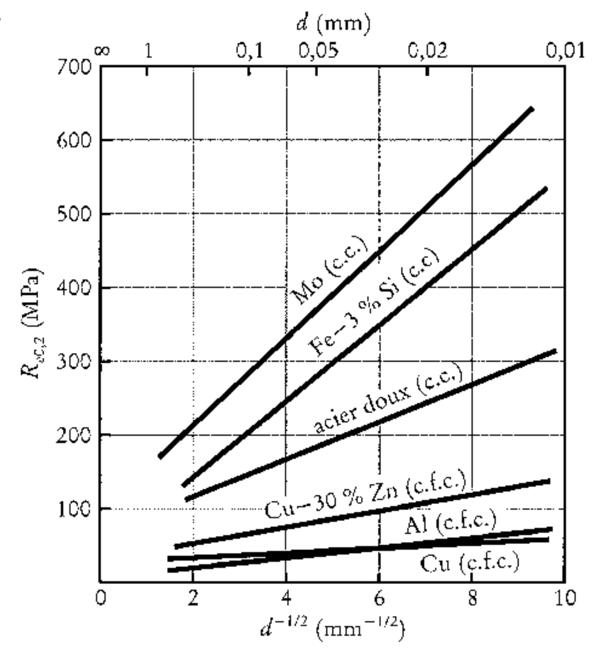
k : coefficient de Petch fonction du matériau

d : taille des grains

σ_0 : cste dont les dimension = contrainte

R_e et R_m Z

$A \rightarrow$



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Influence sur la limite d'élasticité

MEC-200

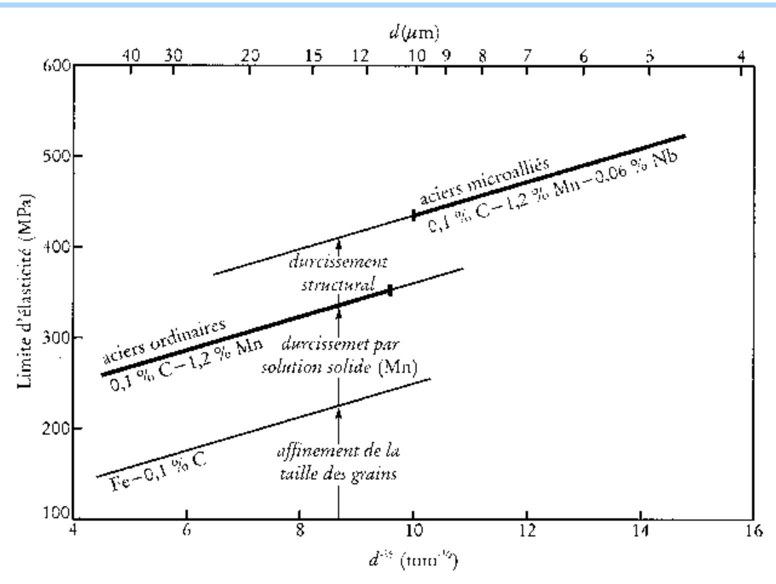


Figure 10.1 Relation de Hall-Petch pour les aciers ordinaires et les aciers microalliés HSLA, et influences combinées de l'affinement de la taille des grains, du durcissement par solution solide et du durcissement structural sur la limite d'élasticité.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Température de transition ductile-fragile

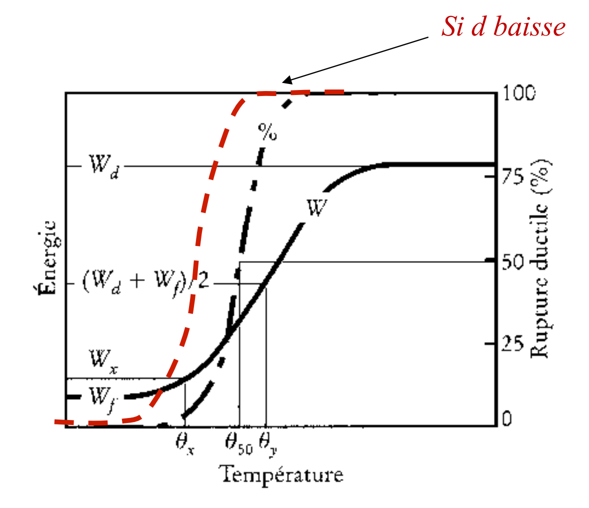
Amélioration de la ténacité => ductilité à plus basse température

$$TTDF = B + kd^{1/2}$$

k : coefficient de Petch (fonction du matériau)

d : taille des grains

B : cste ⇔ température



Il est donc très intéressant de connaître l'évolution de la microstructure et notamment de la taille des grains d'un matériau.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

EXERCICE 6-9

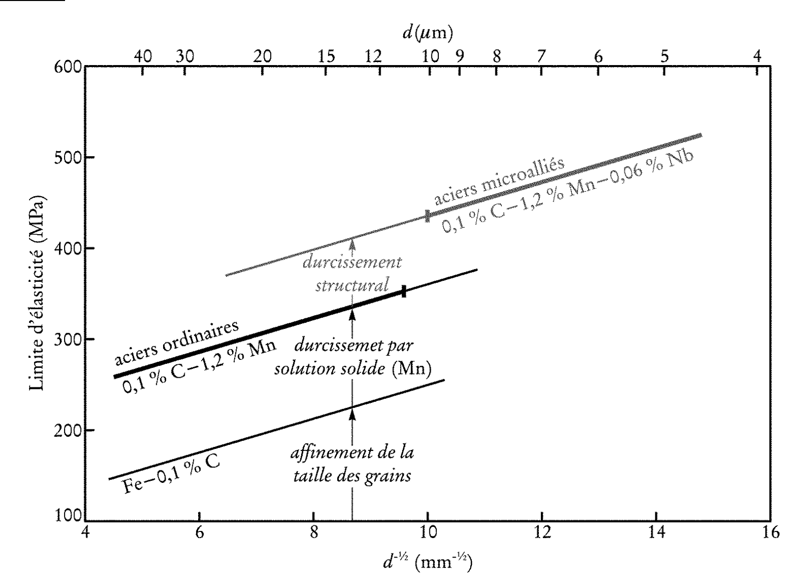
Pour cet exercice, vous devez utiliser la figure 10.1 du livre *Des Matériaux* ou imprimer l'énoncé.

a) Déterminez les paramètres σ_0 et k de la relation de Hall-Petch d'un acier à bas carbone (Fe + 0,1% C).

b) Si on ajoute 0,8 % de manganèse (Mn) à cet acier et qu'il ait alors une taille de grain égale à 12 µm, quelle sera la valeur (en MPa) de sa limite d'élasticité $R_{e0,2}$?

Conseil : on supposera que l'influence d'une addition de manganèse sur la limite d'élasticité est directement proportionnelle au pourcentage de manganèse ajouté à l'acier.

Données :



EXERCICE 6-9

a) Paramètres de la relation de Hall-Petch

Le paramètre σ_0 représente l'ordonnée à l'origine de la droite de Hall-Petch tracée sur une figure donnant la variation de la limite d'élasticité $R_{e0,2}$ en fonction de la variable $d^{-½}$, où d est la taille moyenne des grains de l'alliage.

Le paramètre k est la pente de cette droite.

Grâce à la figure donnée, on obtient les valeurs suivantes :

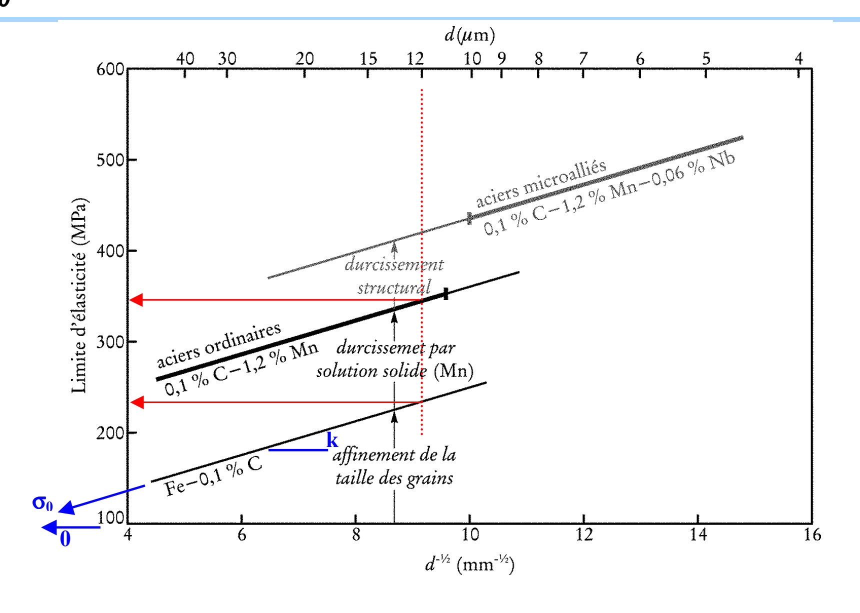
σ_0 = 63 MPa

k = 18 MPa.mm^{½}

b) Limite d'élasticité d'un acier à 0.1% C et 0,8% Mn

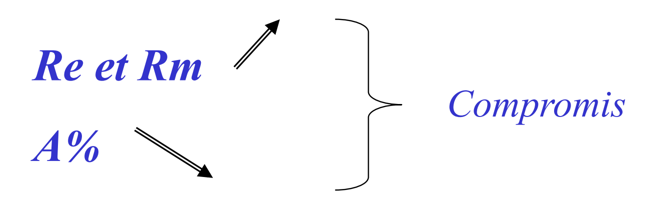
Grâce à la figure donnée, on constate que, pour une taille de grain de 12 µm, il y a un gain de 120 MPa sur la limite d'élasticité (350 MPa – 230 MPa = 120 MPa) lorsque l'on ajoute 1,2 % de manganèse à un acier à 0,1 % C, soit un gain de 10 MPa par 0,1 % de Mn ajouté. Pour une addition de 0,8 %Mn, le gain est donc égal à 80 MPa est l'acier a une limite d'élasticité égale à (230 + 80) MPa = 310 MPa

$R_{e0,2}$ = 310 MPa



MEC-200

3) Durcissement par écrouissage



Influence sur la taille des grains



MEC-200

Rôle des défauts

Dimensions	Type	Concentration ou dimension caractéristique	Influence
0	Lacunes	Concentration : $\simeq 10^{-4}$ à θ_f* $\simeq 10^{-15}$ à θ_a*	Diffusion à l'état solide
	Défauts autointerstitiels	Concentration : $\sim 10^{-16}$ à θ_f $\sim 10^{-35}$ à θ_a	
	Atomes étrangers		Propriétés mécaniques ; conductibilité électrique des isolants et des semi-conducteurs
	Défauts de Frenkel et de Schottky		
1	Dislocations	Densité : $\sim 10^{6}$ à 10^{12} cm/cm³ (métaux) $\simeq 10^{4}$ cm/cm³ (cristaux ioniques)	Propriétés mécaniques ; ductilité ; ténacité
2	Macles ; joints de grains	Taille des grains : de 1 μm à 1 cm	Ductilité ; propriétés mécaniques
3	Précipités		

* θ_f = température de fusion ; θ_a = température ambiante (20 °C).



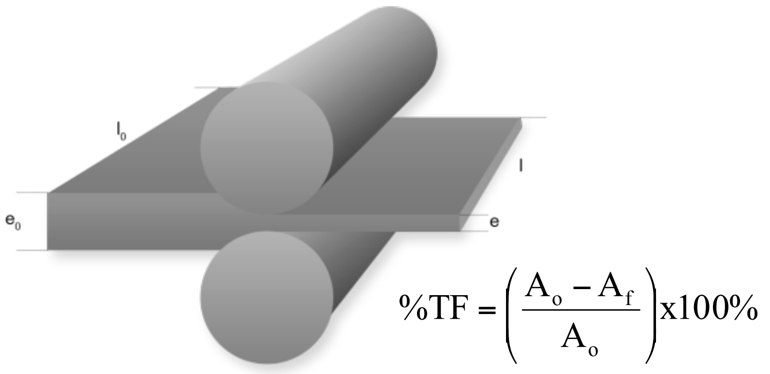
Durcissement par écrouissage

MEC-200

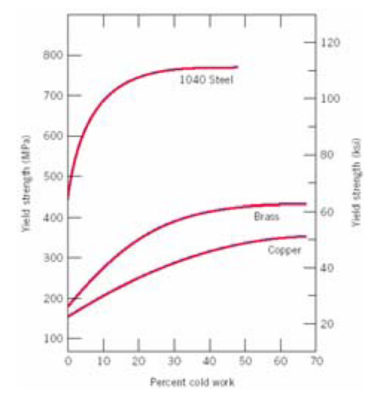
Procédé qui consiste à soumettre un métal ductile à des contraintes mécaniques suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques permanentes.

Application : matériau devient plus dur, plus résistant.

Un des mécanismes de durcissement les plus anciens.



$$\%TF = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o}\right) x100\%$$



Laminage : réduction de l´épaisseur par écrasement entre 2 cylindres.

TF est le travail à froid, A_o et A_f sont les sections transversales initiales et finales.

Limite d´élasticité (MPa) vs % travail à froid

Source: *Science et Génie des Matériaux W.D. Callister*



Application industrielle

MEC-200

Le laminage

Principe : *écrasement du matériau entre 2 rouleaux*

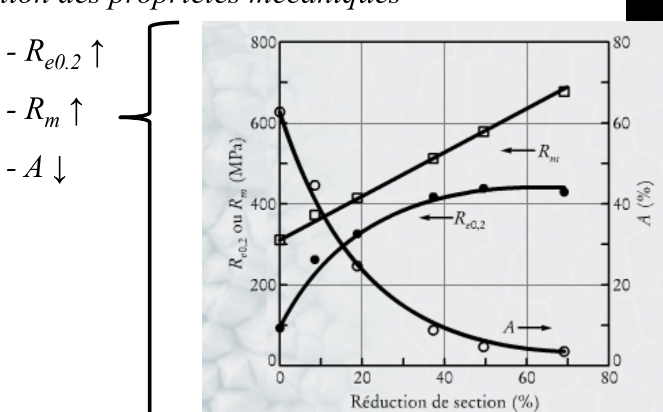
Conséquences :

1- réduction de section $R(\%) = \left(\frac{S_0 - S}{S_0}\right) * 100$

2- Évolution des propriétés mécaniques

S_0 → S

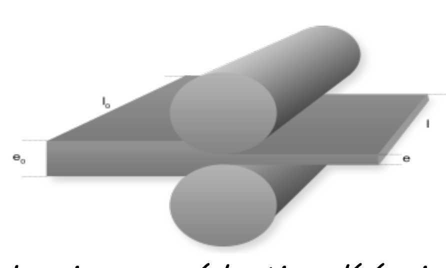
- $R_{e0.2}$ ↑
- R_m ↑
- A ↓



Source: *Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot*



Durcissement par écrouissage



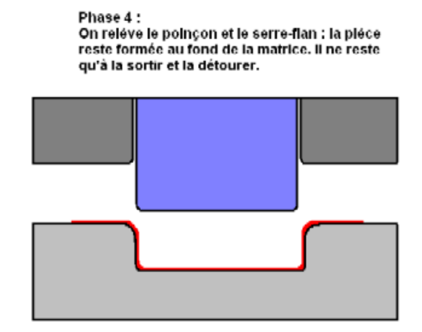
Laminage : réduction d´épaisseur par écrasement entre les cylindres

Forgeage d´un poussoir de soupape





Emboutissage

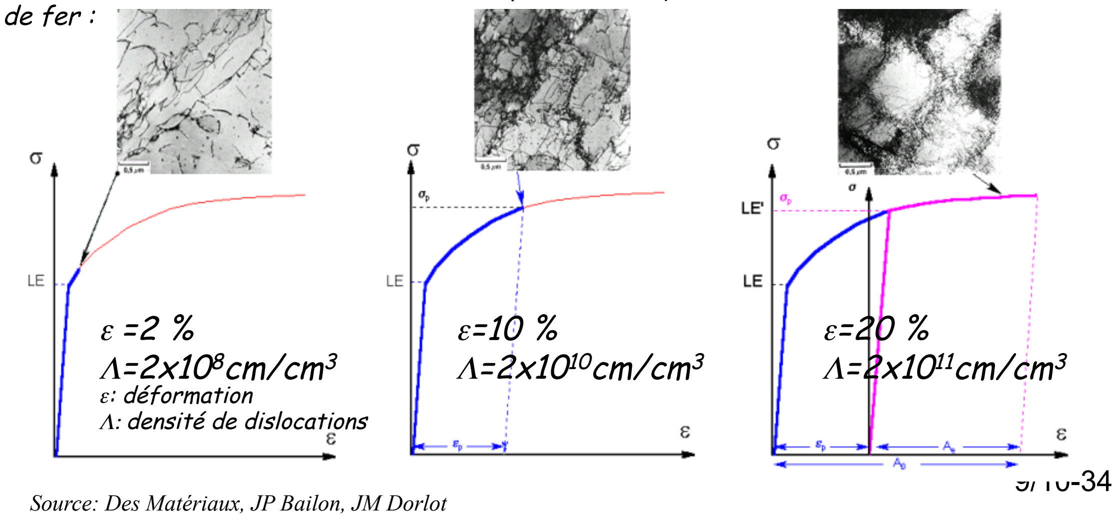




Durcissement par écrouissage

Au cours de la déformation plastique, les dislocations se déplacent et se multiplient, forment des empilements, des noeuds, et leur mouvement est de plus en plus difficile. Il faut donc une contrainte plus élevée pour que les dislocations se déplacent et pour une nouvelle déformation plastique.

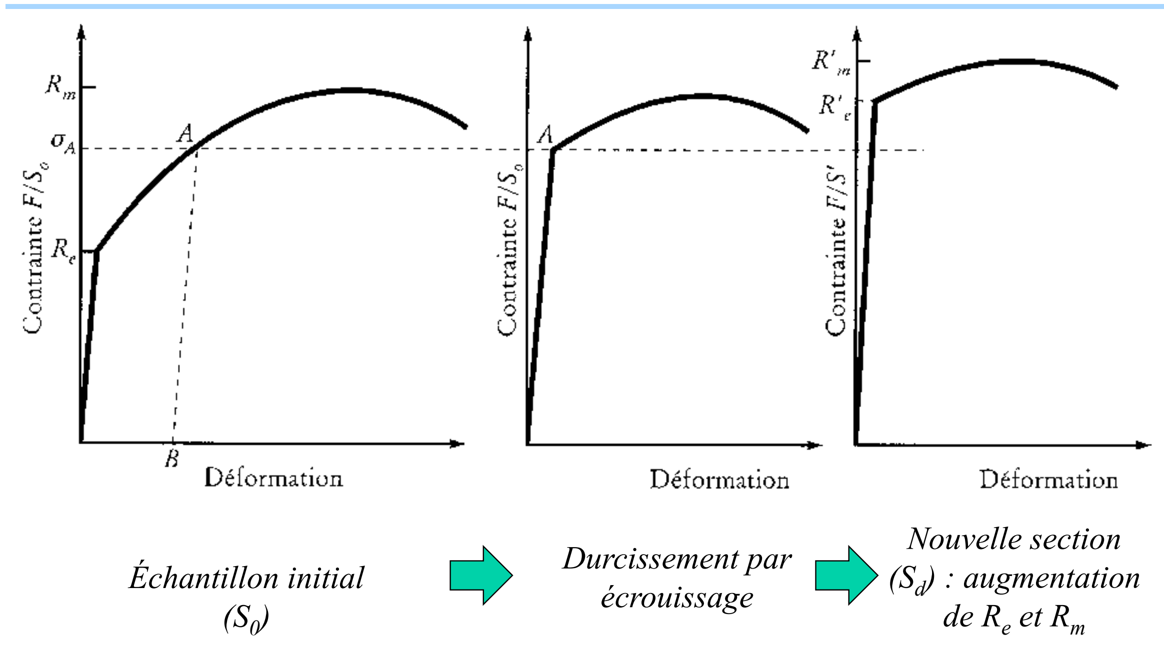
Observation des dislocations au microscope électronique à transmission sur des échantillons de fer :



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot




Durcissement par écrouissage

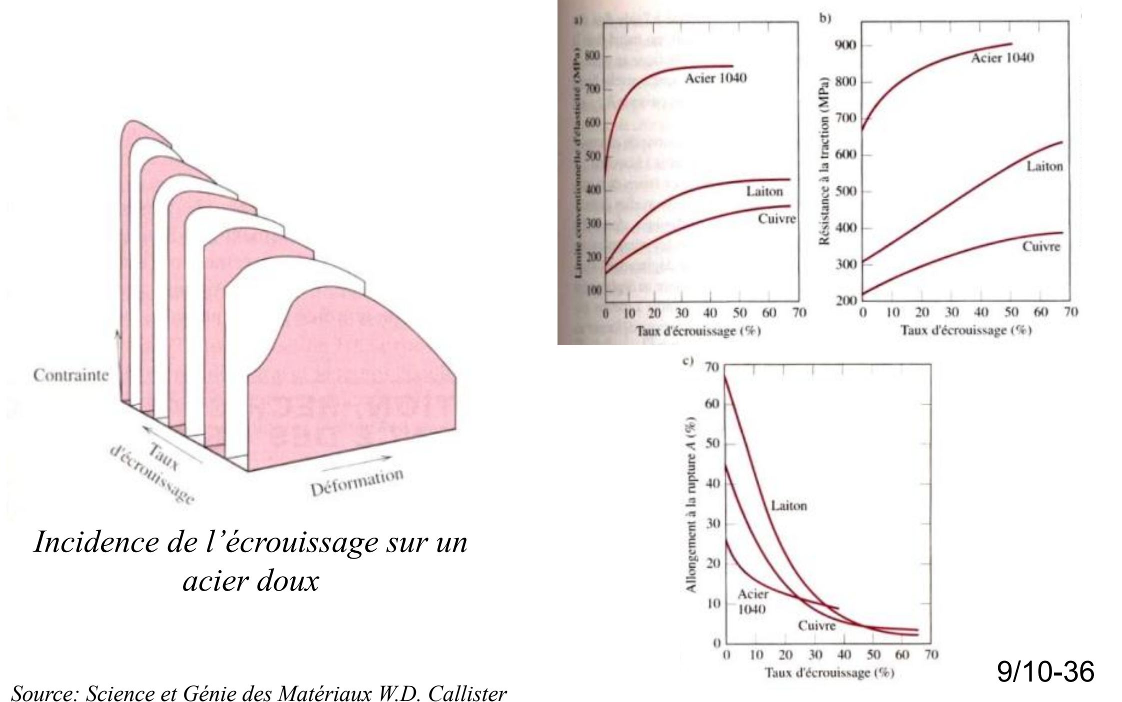


Échantillon initial (S_0) → *Durcissement par écrouissage* → *Nouvelle section (S_d) : augmentation de R_e et R_m*

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Variation de R_e, R_m et A %



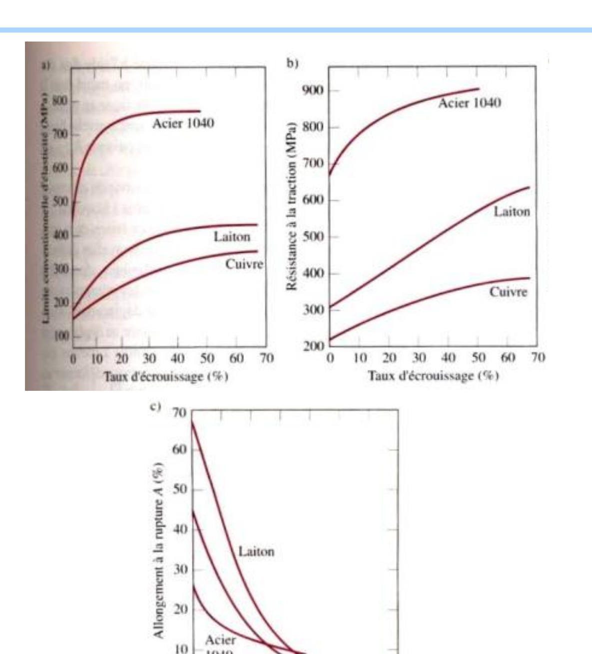
Incidence de l'écrouissage sur un acier doux

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



Exercice

Calculez la résistance à la traction et l'allongement à la rupture (A) d'une tige cylindrique dont le diamètre passe de 15.2 à 12.2 mm par suite d'un écrouissage.

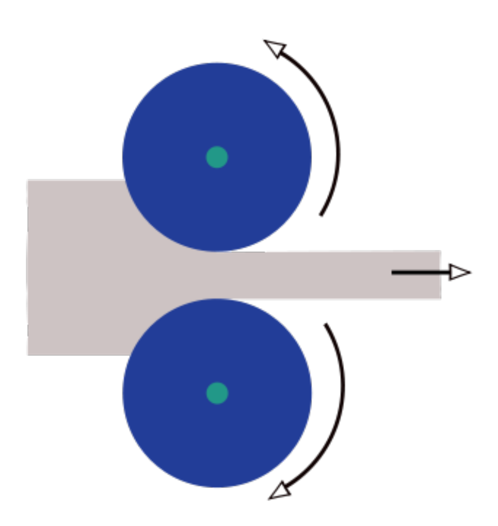


Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



Laminage

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelé laminoir.

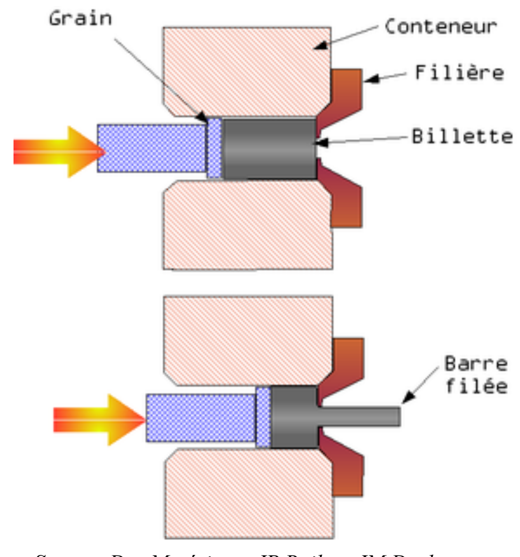


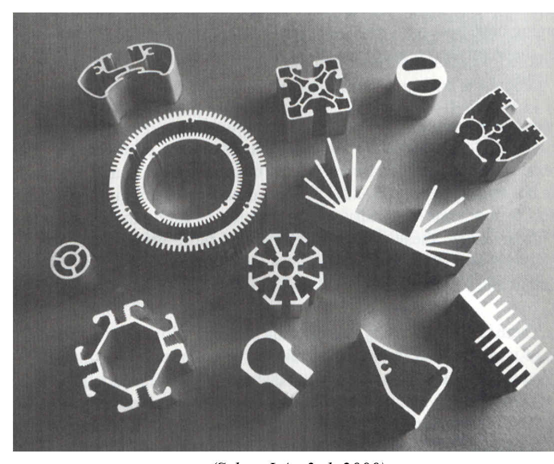


MEC-200

Extrusion (filage)

L'extrusion consiste à pousser un matériau ductile à travers un trou, ou filière.





(Schey J.A., 3rd, 2000)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Tréfilage

Le tréfilage est la réduction de la section d'un fil par traction mécanique.

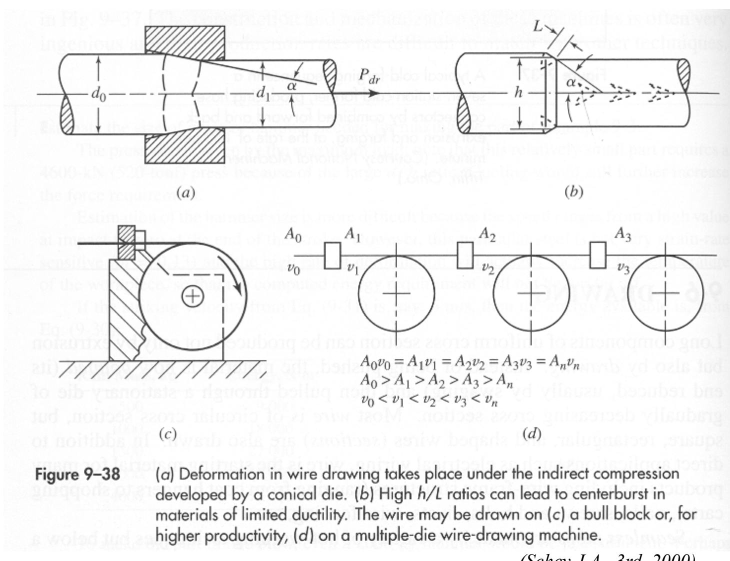


Figure 9–38 (a) Deformation in wire drawing takes place under the indirect compression developed by a conical die. (b) High h/L ratios can lead to centerburst in materials of limited ductility. The wire may be drawn on (c) a bull block or, for higher productivity, (d) on a multiple-die wire-drawing machine.

(Schey J.A., 3rd, 2000)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Désignation des états écrouis

Cas des alliages de cuivre

État	Écrouissage (%)	
	plats	fils
Recuit	0	0
1/4 dur	11	21
1/2 dur	21	37
3/4 dur	30	50
Dur	37	60
Extra-dur	50	75
Ressort	60	84
Ressort extra-dur	69	90

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Durcissement par écrouissage

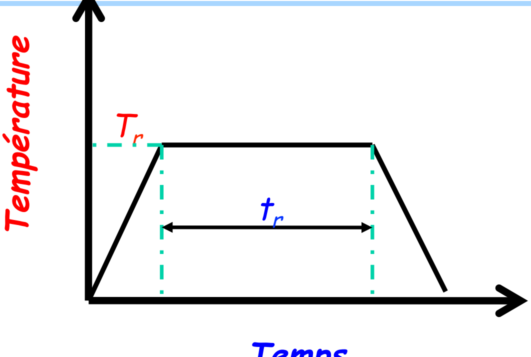
- Conformation aprés écrouissage peut être limitée.
  - Ex : tole obtenue par laminage à froid peut être trop résistante et pas assez ductile pour être emboutie pour faire une carrosserie d´automobile.
  - Déchirures
- Nécessité d´un recuit



Nécessité de recuit

MEC-200

- Après écrouissage
- Recuit :
  - 3 étapes
  - Chauffer jusqu´à une température élevée T_r,
  - Maintien de la pièce à cette température pour une durée t_r,
  - Refroidissement.



- *But :*
  - *Relaxation des tensions,*
  - *Augmentation de la ductilité,*
  - *Produire une certaine microstructure avec taille de grains controllée.*

Paramètres dont dépend le recuit :

- *Précedent travail à froid,*
- *T_r : température de recuit,*
- *t_r : durée du recuit,*
- *Présence d´impurité.*



Recuit

MEC-200

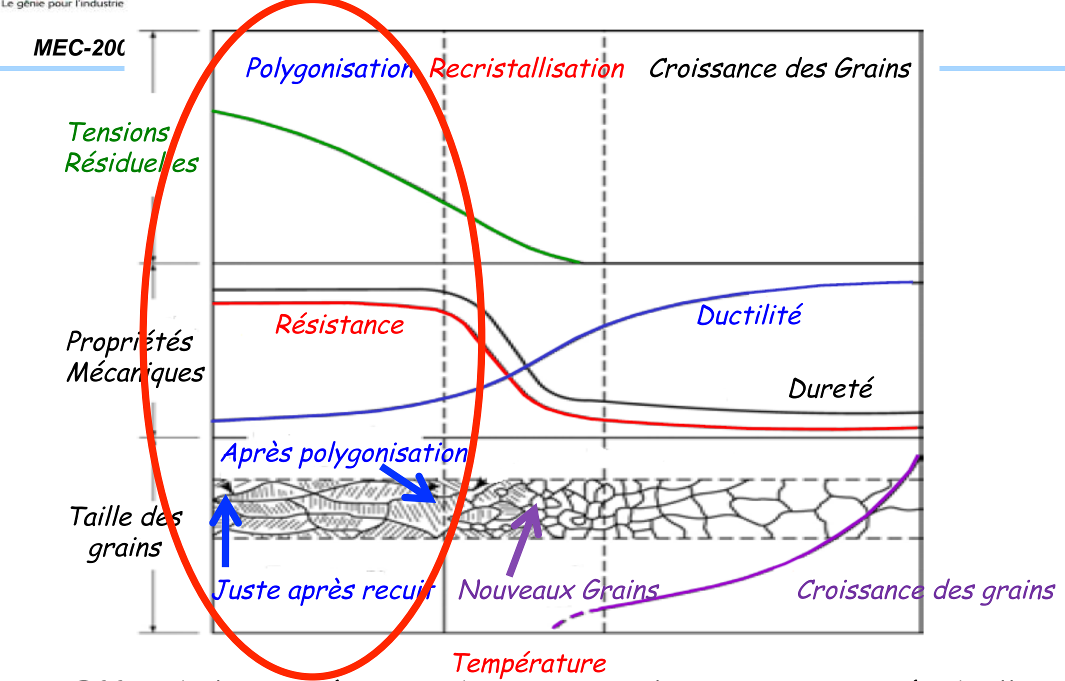


ceradelindustries.com



www.bodycote.com.br/tt/af.asp

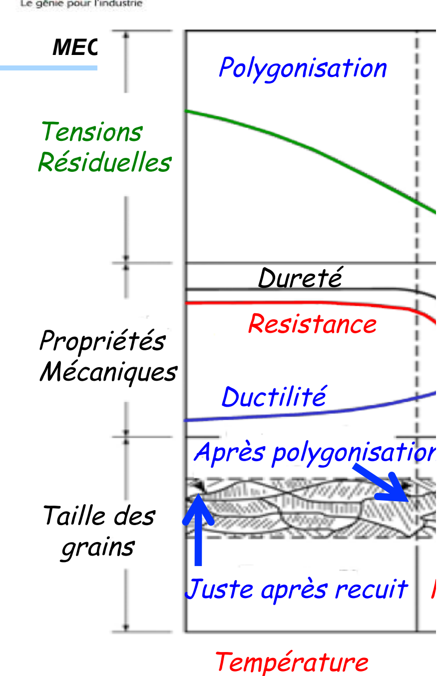
Restauration et recristallization



Effet de la température de recuit sur les contraintes résiduelles, propriétés mécaniques et microstructure

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Restauration



$T < 0,3\ T_f$ (K)

T_f: Température de fusion

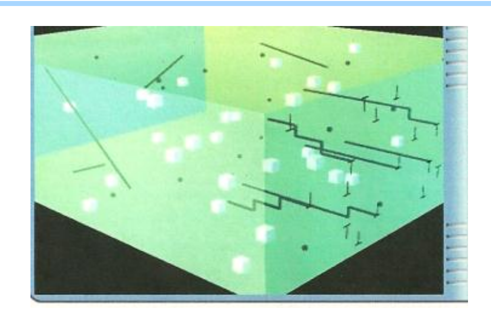
- Dislocations s´éloignent les unes des autres et s´allignent selon des configurations plus stables dont l´énergie est moindre.

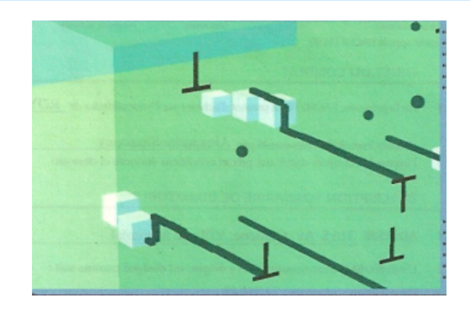
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

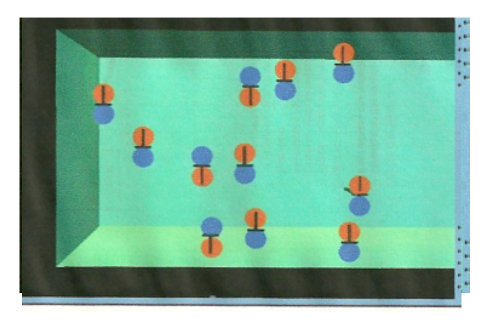


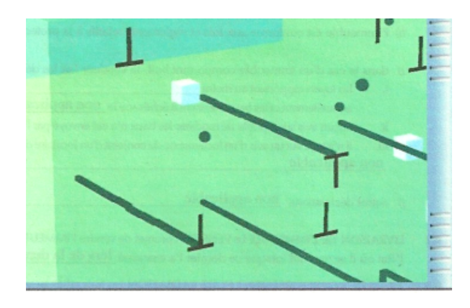
Polygonisation

MEC-200







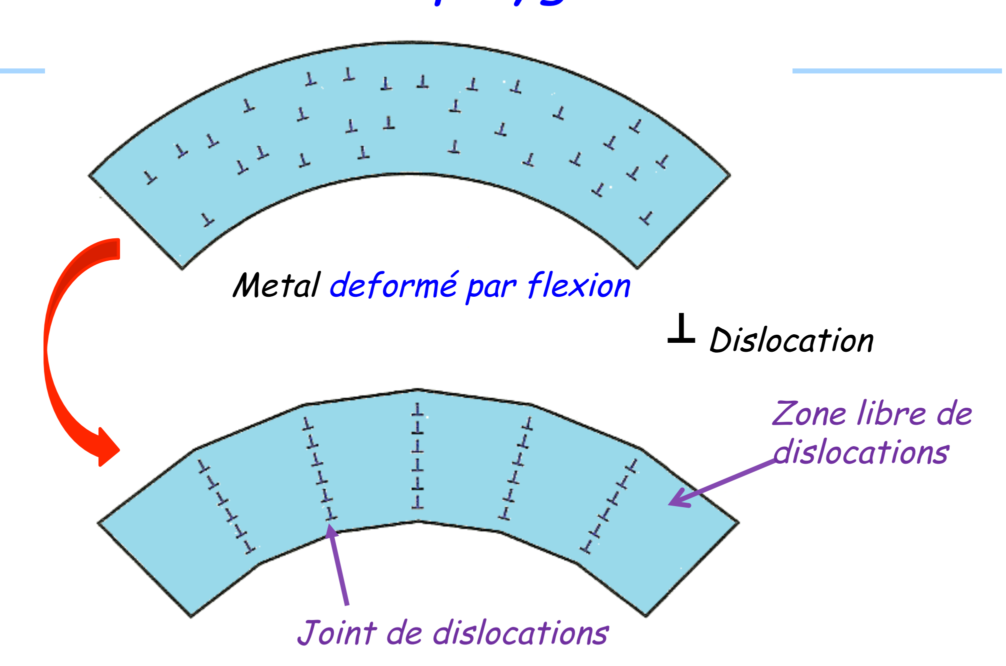


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Restauration - polygonisation

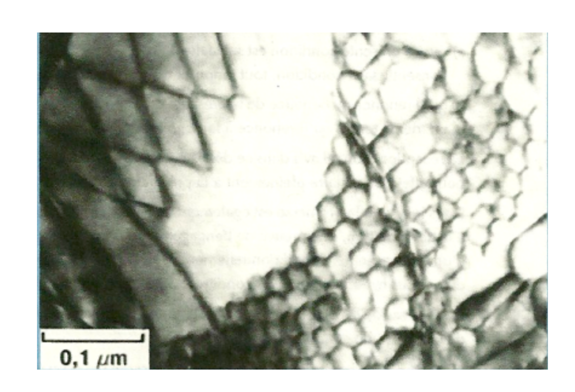
MEC-200



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

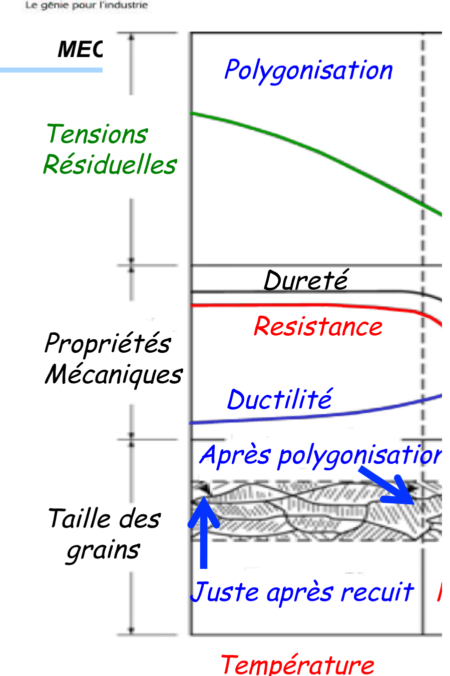


Restauration - polygonisation



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Restauration



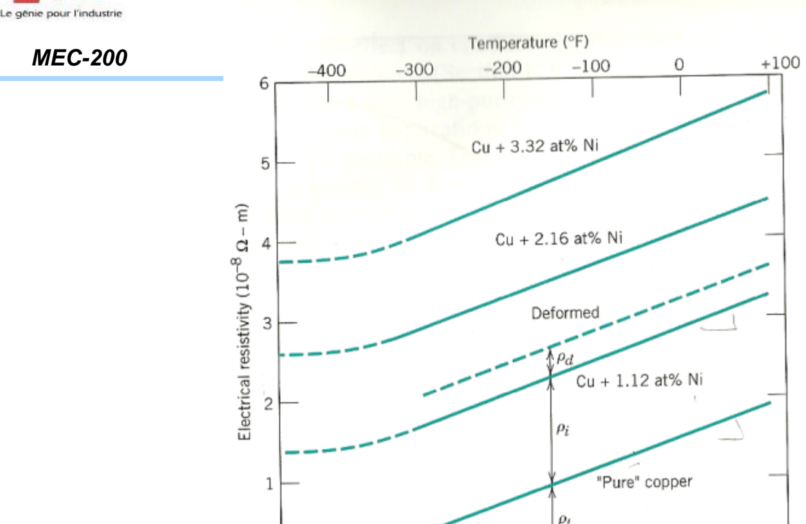
T< 0,3 T_f (K)

T_f: Température de fusion

- *Dislocations s´éloignent les unes des autres et s´allignent selon des configurations plus stables dont l´énergie est moindre.*
- Tensions résiduelles diminuent
- Pas de gros changements pour propriétés mécaniques
- Pas de gros changements des grains
- Défauts pontuels disparaissent.
  - Baisse de la résistivité électrique.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

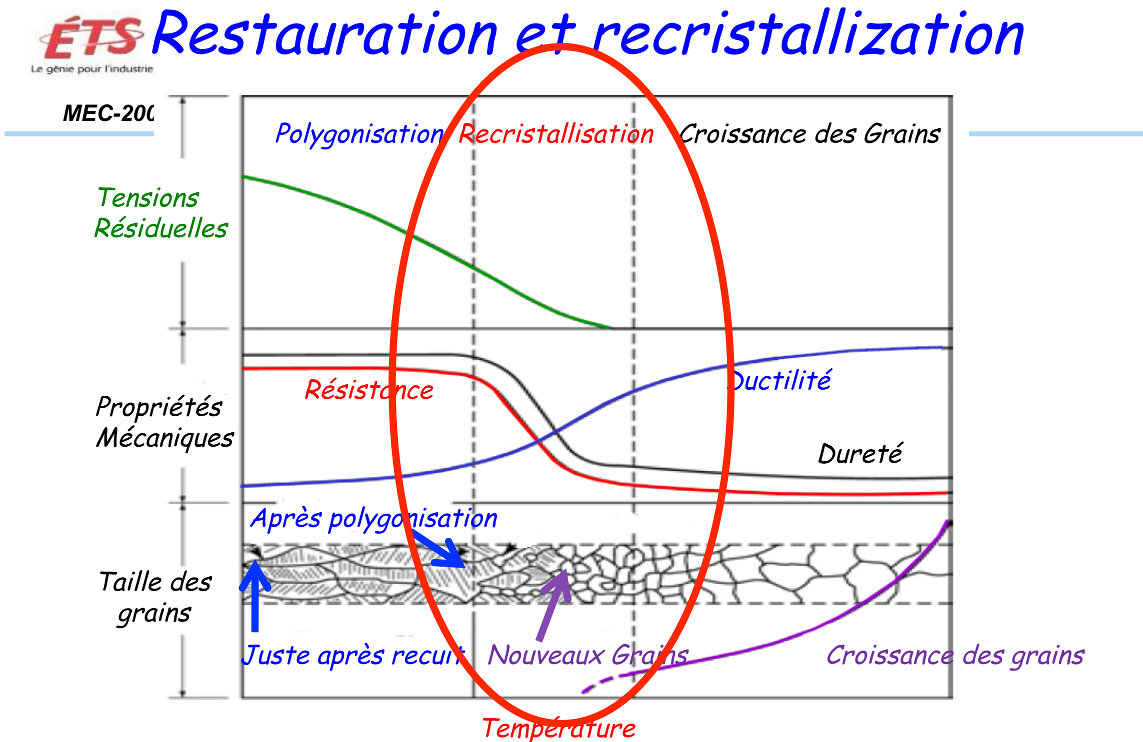




Règle de Mathiessen : resistivité total = $\rho_t + \rho_i + \rho_d$

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

Restauration et recristallization



Effet de la température de recuit sur les contraintes résiduelles, propriétés mecaniques et microstructure.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Recristallisation

$0,3\ T_f < T_r < 0,6\ T_f\ (K)$

Recristallisation

Tensions Résiduelles

Dureté

Propriétés Mécaniques

Ductilité

Résistance

Taille des grains

Nouveaux Grains

Température

T_r : Température de recristallisation
T_f : Température de fusion

- Réagencement des atomes des grains déformés en un nouveau assemblage de grains entièrement nouveaux libres de tension

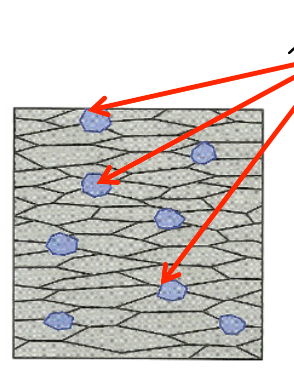
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

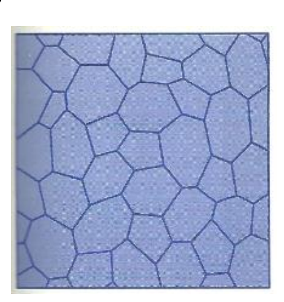


MEC-200

Recristallisation

Croissance de grains équiaxiaux aux points d´énergie maximale





Microstructure aprés travail à froid et polygonisation

Microstructure durant recristallisation

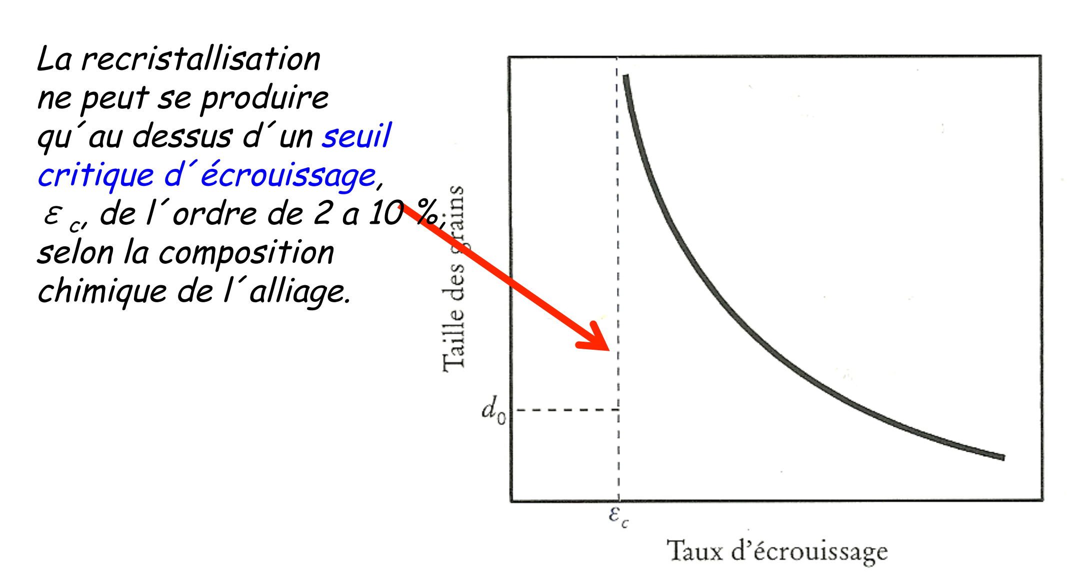
Microstructure après recristallisation

Plus le travail à froid, l´écrouissage est important, plus le nombre de sites favorables à la germination est grand, plus les grains, lors de la recristalisation, seront petits.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Recristallisation

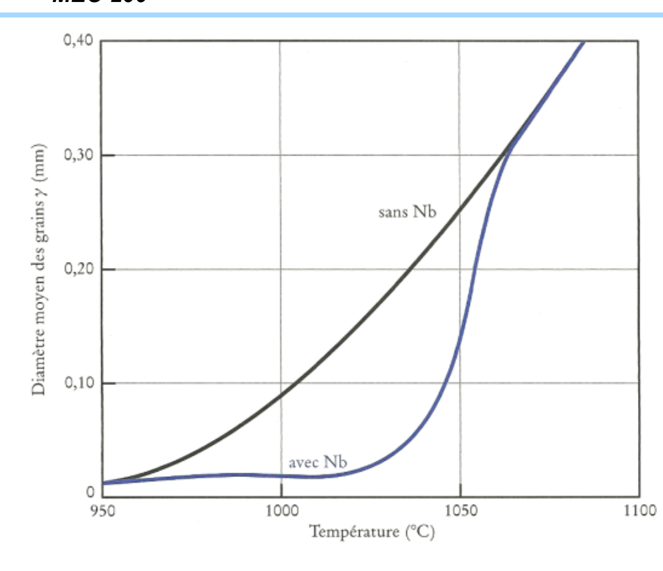


Taille des grains recristallisés en fonction du taux d´écrouissage initial

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Croissance des grains



Effet du niobium (présence de carbure de niobium, NbC) sur la croissance des grains austéniques d´un acier (0.1 %C)

Les impurités rendent la croissance des grains plus difficile.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Recristallisation

$0,3\ T_f < T_r < 0,6\ T_f\ (K)$

Recristallisation

Tensions Résiduelles

Dureté

Propriétés Mécaniques

Ductilité

Résistance

Taille des grains

Nouveaux Grains

Température

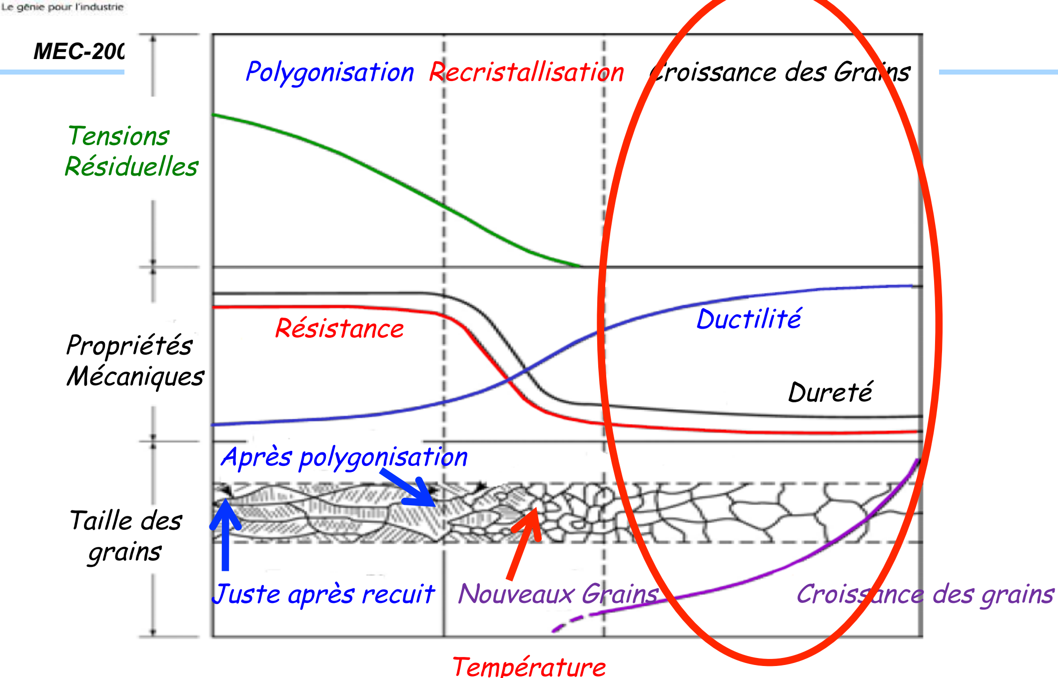
T_r: Température de recristallisation
T_f: Température de fusion

- Réagencement des atomes des grains déformés en un nouveau assemblage de grains entièrement nouveaux libres de tension
- Température optimisée
  - Recristallisation en une heure
  - Eviter une croissance de grains trop importante
  - Dépend des impuretés
    - Plus élevée quand plus d´impuretés
- Résistance diminue, ductilité augmente
- Diminution de la densité de dislocations
  - Λ diminue de 10^{10}, 10^{13} vers 10^{7} cm/cm^3

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Restauration et recristallization

MEC-20(

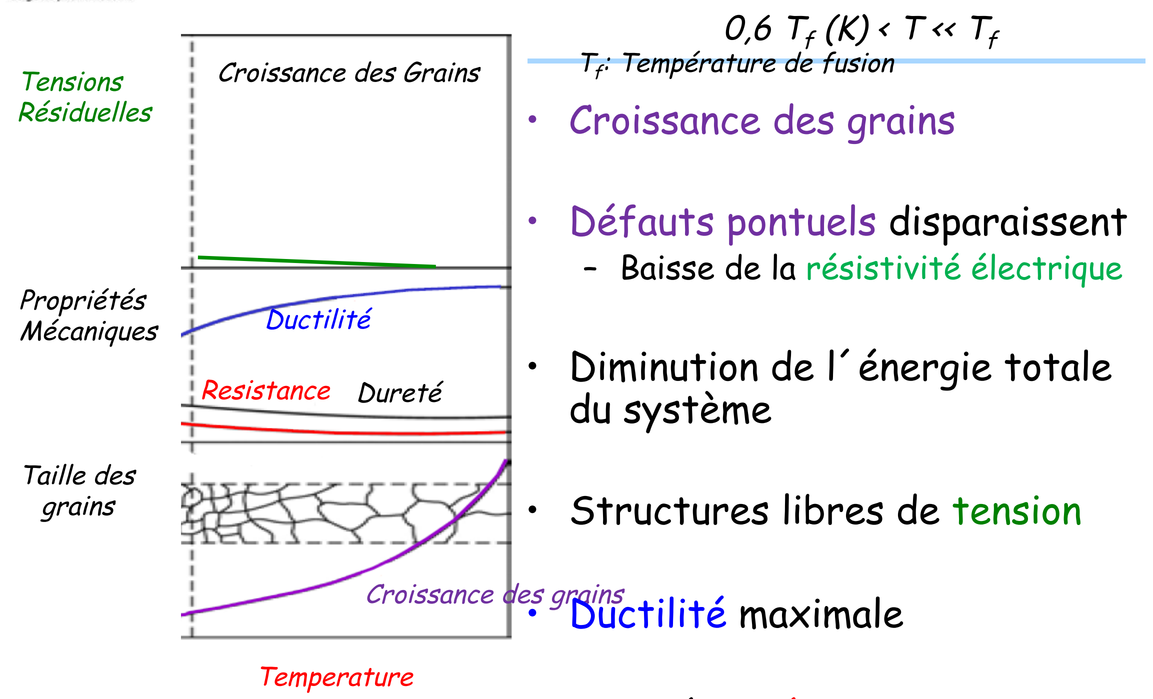


Température

Effet de la température de recuit sur les contraintes résiduelles, propriétés mécaniques et microstructure

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Croissance des grains



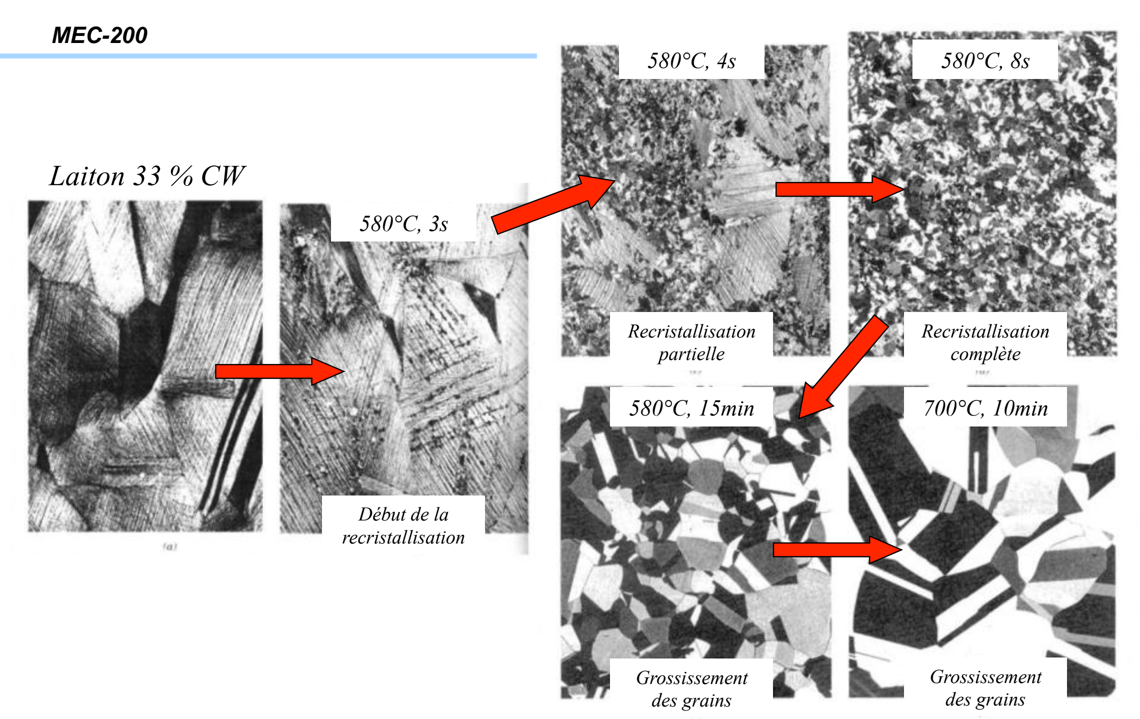
- Croissance des grains
- Défauts pontuels disparaissent
  - Baisse de la résistivité électrique
- Diminution de l´énergie totale du système
- Structures libres de tension
- Ductilité maximale
- Dureté et résistance minimum

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Évolution de la microstructure

MEC-200

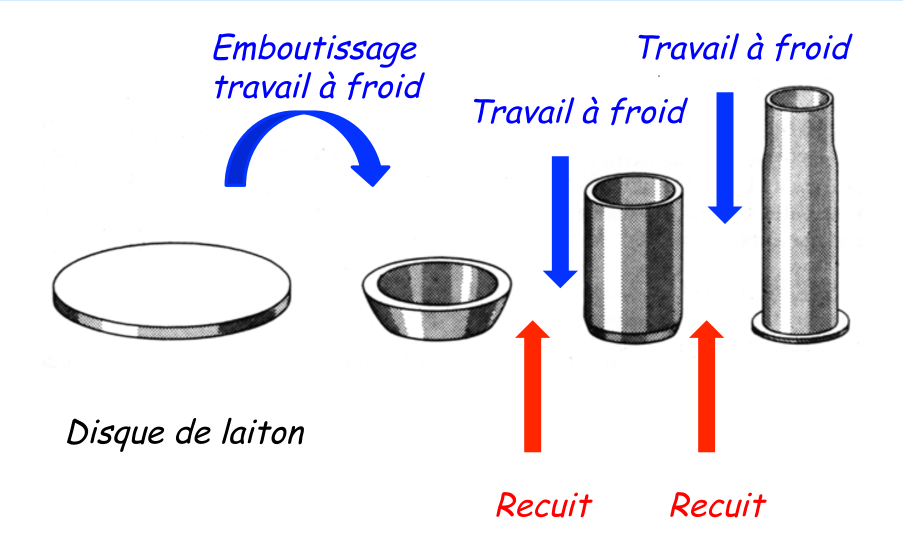


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Travail à froid, restauration et recristallisation : application



Fabrication des cartouches Norma à l'usine d'Amotfors en Suède : Utube

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



MEC-200

Résumé

- Travail à froid
  - Déformation plastique
  - Résistance et dureté augmentent, ductilité diminue
  - Multiplication des dislocations, écrasement des grains
- Restauration et recristallisation
  - Recuit
  - Restauration : diminution de la densité de dislocations, polygonisation, pas de changement de structure des grains, tensions résiduelles diminuent
  - Recristallisation : apparition de nouveaux grains, résistance diminue, ductilité augmente.

ÉTS
Le génie pour l'industrie

MEC-200

Travail à froid

Écrouissage

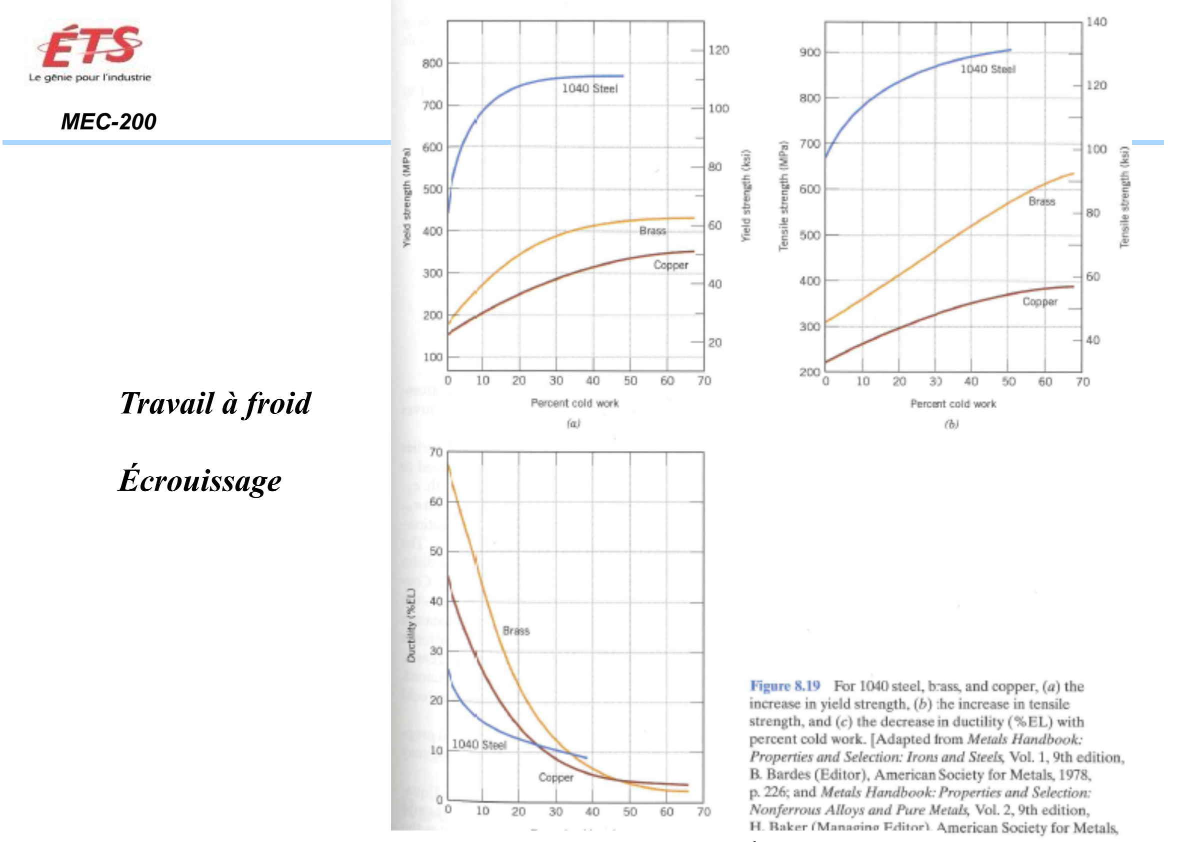


Figure 8.19 For 1040 steel, brass, and copper, (a) the increase in yield strength, (b) the increase in tensile strength, and (c) the decrease in ductility (%EL) with percent cold work. [Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, p. 226; and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), American Society for Metals,

W.D. Calister et D.G Rethish; Fundamentals of materials Science and Engineering, 3rd edition, Wiley, 2007



Types de recuit et buts

MEC-200

- *Le recuit de recristallisation*

  Atténuer ou éliminer les effets d'écrouissage => adoucissement d'un métal préalablement déformé => augmentation de sa ductilité.

  Très utilisé dans le domaine de la mise en forme par déformations plastiques.

- *Le recuit de détente*

  Éliminer les contraintes résiduelles dans les pièces.



MEC-200

Exemples

Métal ou alliage	Limite d'élasticité $R_{e0,2}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A (%)
Aluminium 99,99 %			
recuit	20	45	50
écroui	100	120	7
Al–7075			
recuit	100	225	16
trempé et vieilli	500	570	11
Fe–0,0008 % C			
recuit	120	250	38
Acier mi-dur (0,55 % C)			
normalisé à 850 °C	430	800	14
trempé à l'huile à partir de 850 °C et revenu à 550 °C	705	1000	8
Corde à piano (acier à 0,8 % C ; perlite fine déformée par tréfilage de 90 %)	1800	2800	1,6



MEC-200

4) Durcissement structural

Principe : formation de précipités qui vont gêner le mouvement des dislocations



Rôle des défauts

MEC-200

Dimensions	Type	Concentration ou dimension caractéristique	Influence
0	Lacunes	Concentration : $\sim 10^{-4}$ à θ_f* ; $\simeq 10^{-15}$ à θ_a*	Diffusion à l'état solide
	Défauts autointerstitiels	Concentration : $\sim 10^{-15}$ à θ_f ; $\sim 10^{-35}$ à θ_a	
	Atomes étrangers		Propriétés mécaniques ; conductibilité électrique des isolants et des semi-conducteurs
	Défauts de Frenkel et de Schottky		
1	Dislocations	Densité : $\sim 10^{6}$ à 10^{12} cm/cm^3 (métaux) ; $\simeq 10^{4}$ cm/cm^3 (cristaux ioniques)	Propriétés mécaniques ; ductilité ; ténacité
2	Macles ; joints de grains	Taille des grains : de 1 µm à 1 cm	Ductilité ; propriétés mécaniques
3	Précipités	Dimensions : de 5 nm à 0,10 mm	Propriétés mécaniques ; traitement thermiques ; propriétés magnétiques

* θ_f – température de fusion ; θ_a – température ambiante (20 °C).



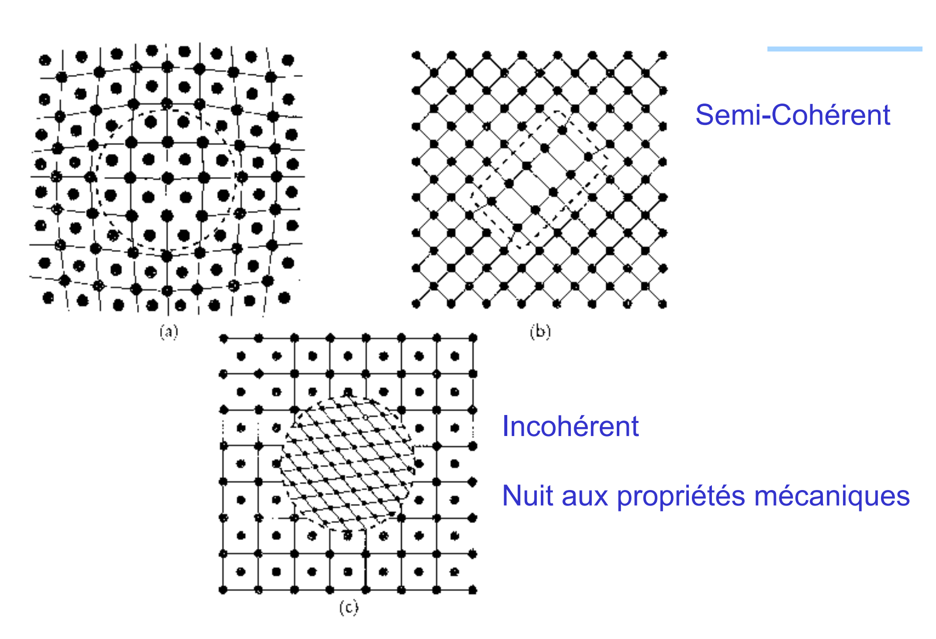
Schémas des précipités

MEC-200

Cohérent

Introduit des distorsions élastiques

Semi-Cohérent



Incohérent

Nuit aux propriétés mécaniques

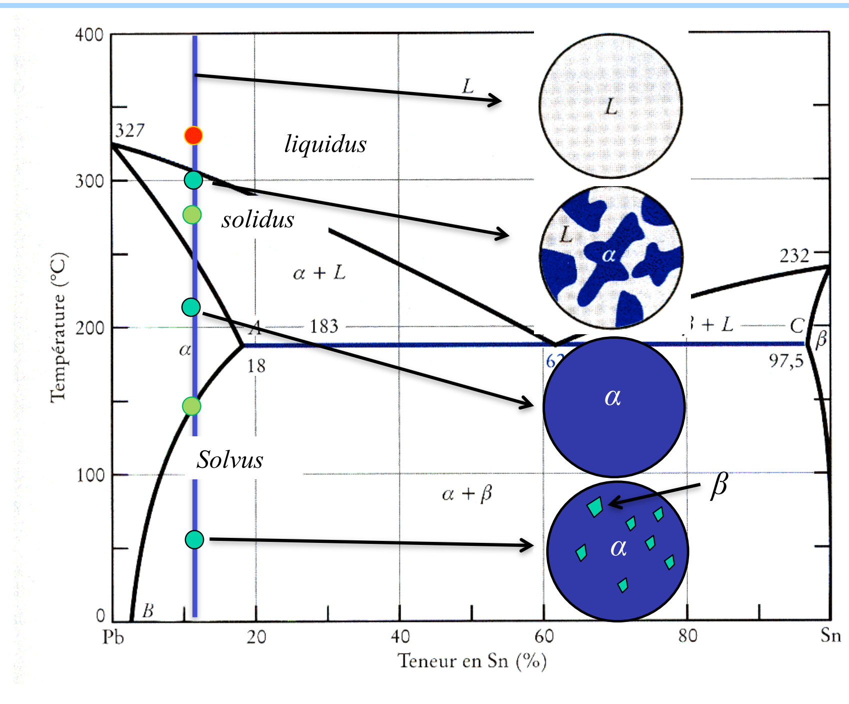
Figure 3.38 Représentations schématiques de précipités dans les solides cristallins : a) précipité cohérent avec distorsion du réseau due à une variation de volume ; b) précipité semi-cohérent ; c) précipité incohérent.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Diagramme d'équilibre Pb-Sn

MEC-200



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

4) Durcissement structural

Principe : formation de précipités qui vont gêner le mouvement des dislocations

Méthode : Série de chauffage et refroidissement contrôlés (Traitement thermiques)

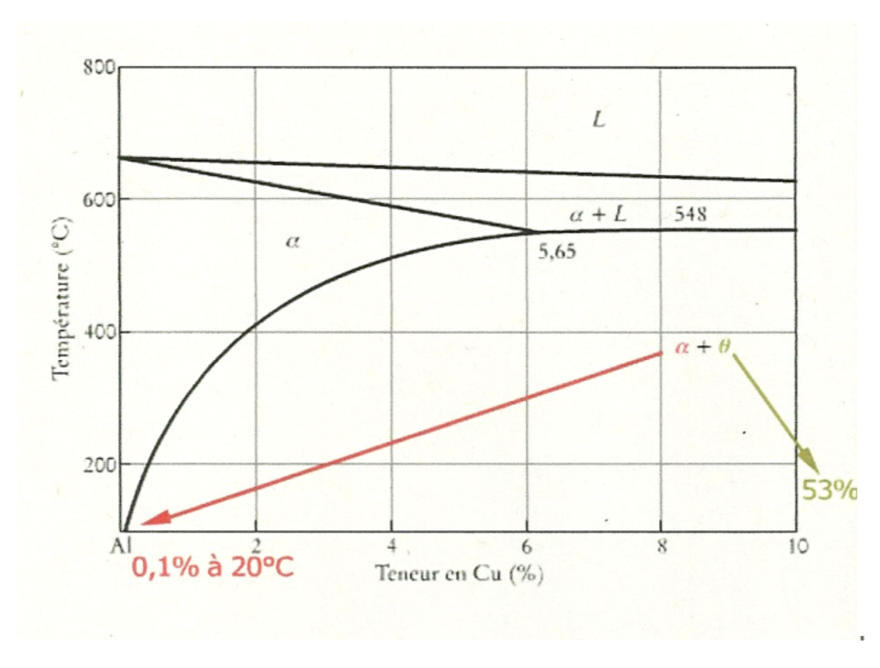
→Répartition optimale des précipités (particule de 2e phase) dans la matrice

→ amélioration des propriétés mécaniques (Rm et Re)



Diagramme d’équilibre Al-Cu

MEC-200

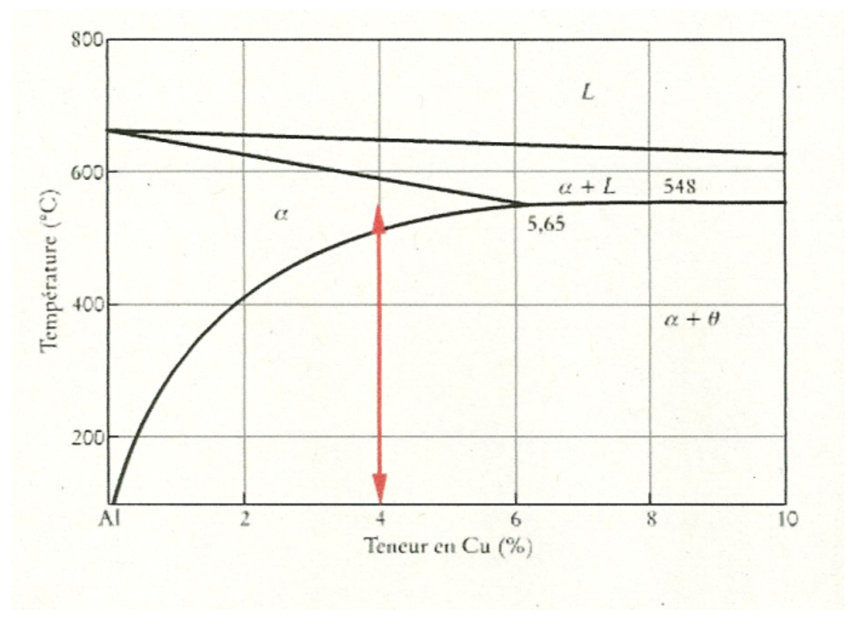


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Diagramme d’équilibre Al-Cu

MEC-200



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

En résumé
Diagramme d'équilibre Al-Cu

MEC-200

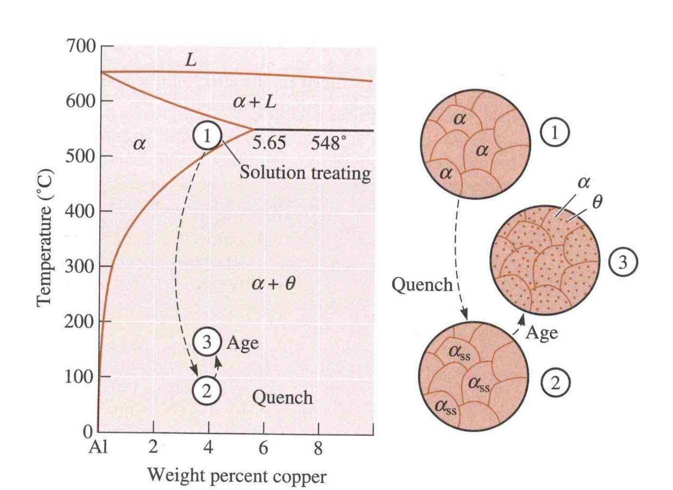


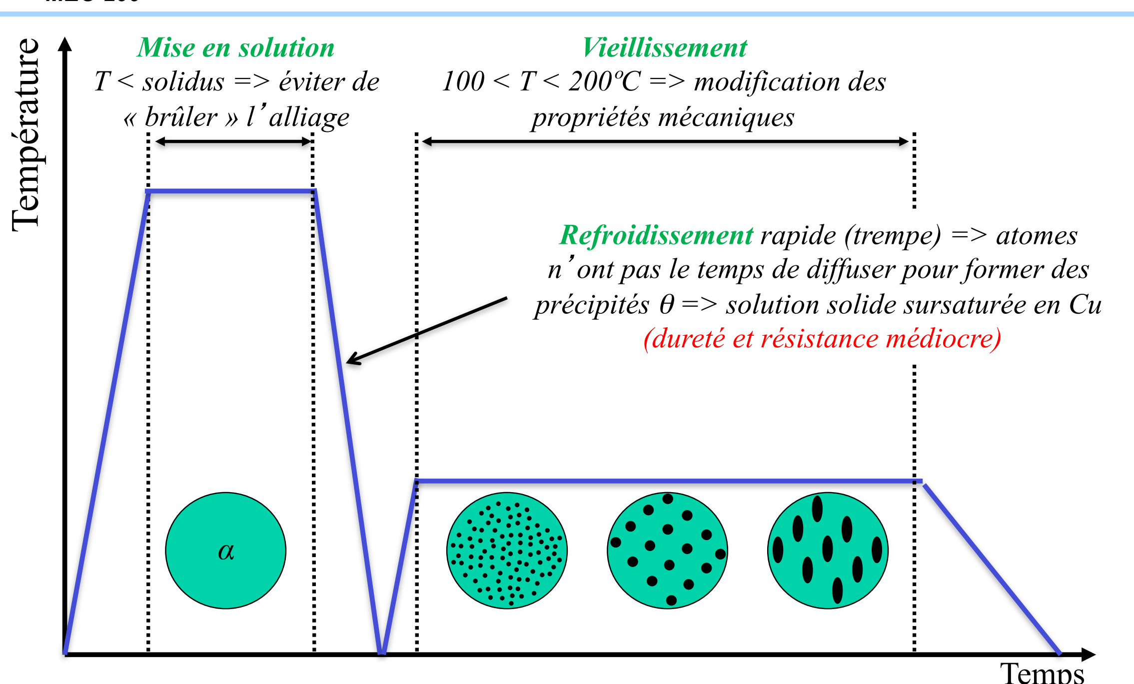
Figure 12-7 The aluminum-rich end of the aluminum-copper phase diagram showing the three steps in the age-hardening heat treatment and the microstructures that are produced.

Source: *Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay*



Étapes d'un traitement thermique

MEC-200



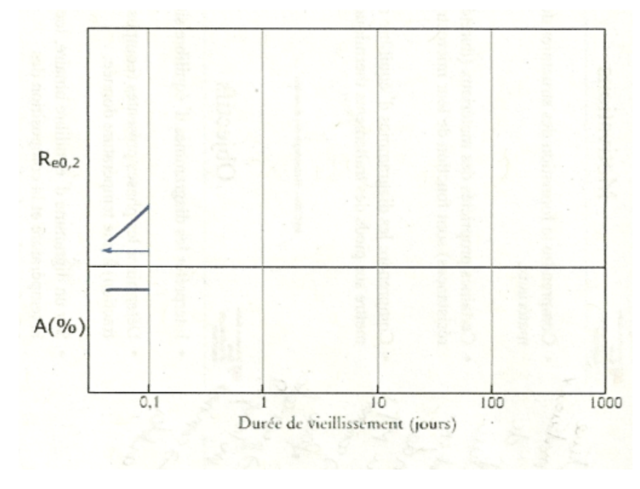
Source: *Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot*



MEC-200

Vieillissement de l'alliage
Effet du durcissement structural

Solution solide sursaturée en Cu (pas en équilibre) => retour à l'équilibre (précipité de $CuAl_2$)
- Retour très lent à température ambiante (dizaines d'années) => vieillissement naturel
- Plus rapide à température plus grande => vieillissement artificiel



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

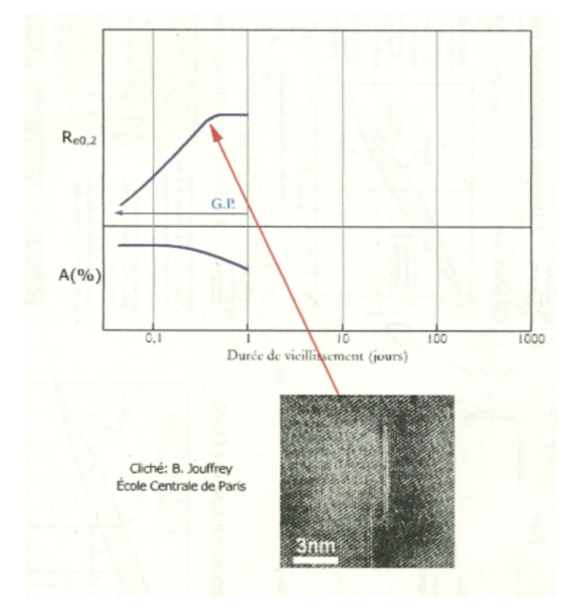


MEC-200

Effet du durcissement structural

Au cours du vieillissement

1- Formation de zones de Guinier-Preston : petits amas d'atomes de Cu (diamètre = 5 nm)



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

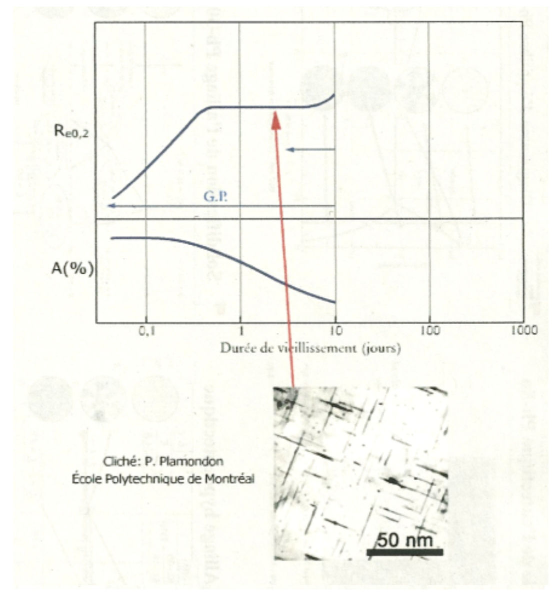


Effet du durcissement structural

Au cours du vieillissement

1- Formation de zones de Guinier-Preston : petits amas d'atomes de Cu (diamètre = 5 nm)

2. Évolution des zones de Guinier-Preston => formes intermédiaire de $CuAl_2$ (θ") . Ces précipités cohérents n' ont pas la composition de la phase θ d' équilibre.



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



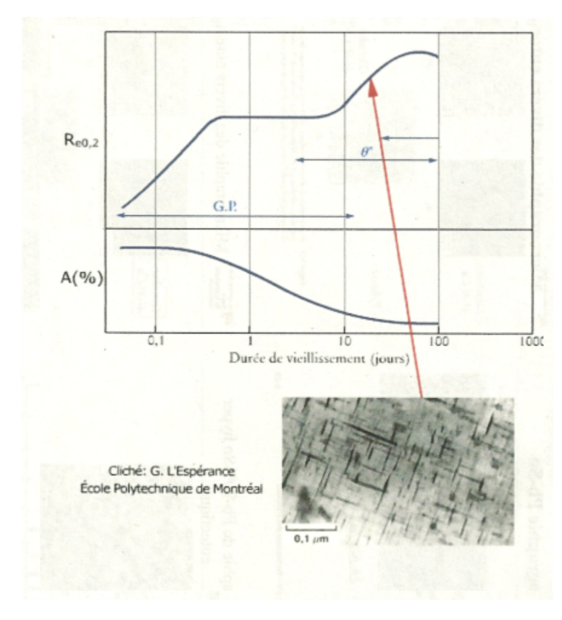
Effet du durcissement structural

Au cours du vieillissement

1- Formation de zones de Guinier-Preston : petits amas d'atomes de Cu (diamètre = 5 nm)

2. Évolution des zones de Guinier-Preston => formes intermédiaire de $CuAl_2$ (θ"). Ces précipités cohérents n' ont pas la composition de la phase θ d' équilibre

3. formes intermédiaires de $CuAl_2$ (θ' et θ") précipités semi-cohérents (diamètre = 10 nm, distance entre précipités = 20 nm)=> limite d'élasticité maximale, ductilité minimale



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Effet du durcissement structural

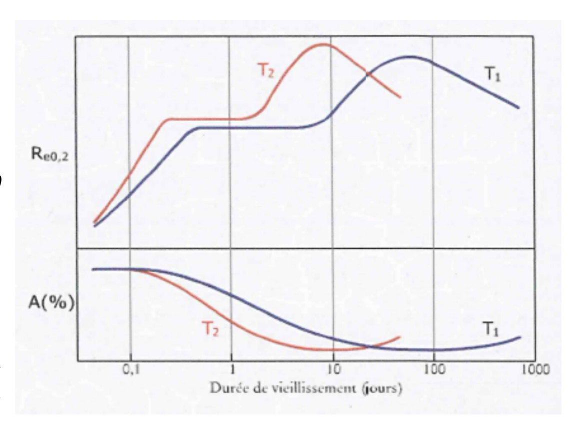
Au cours du vieillissement

1- Formation de zones de Guinier-Preston : petits amas d'atomes de Cu (diamètre = 5 nm)

2. Évolution des zones de Guinier-Preston => formes intermédiaire de $CuAl_2$ (θ"). Ces précipités cohérents n' ont pas la composition de la phase θ d' équilibre

3. formes intermédiaires de $CuAl_2$ (θ' et θ") précipités semi-cohérents (diamètre = 10 nm, distance entre précipités = 20 nm)=> limite d'élasticité maximale, ductilité minimale

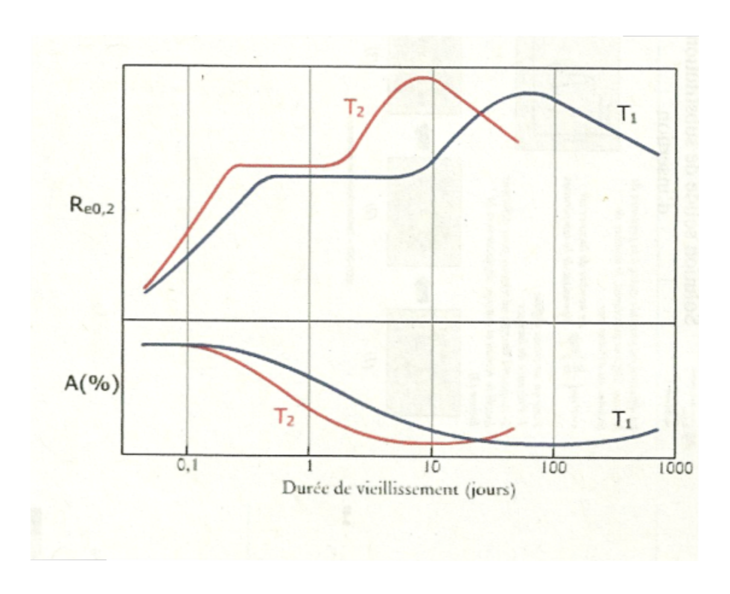
4. Formation des précipités θ qui sont trop gros et trop distants pour donner du durcissement structurel.





Effet du durcissement structural

Effet de la température



Remarques :

- La trempe ne durcit pas l'alliage ici.

- Très bonne ductilité après trempe => facilité de mise en forme par écrouissage.

- Le durcissement a lieu au cours du vieillissement (par précipitation).

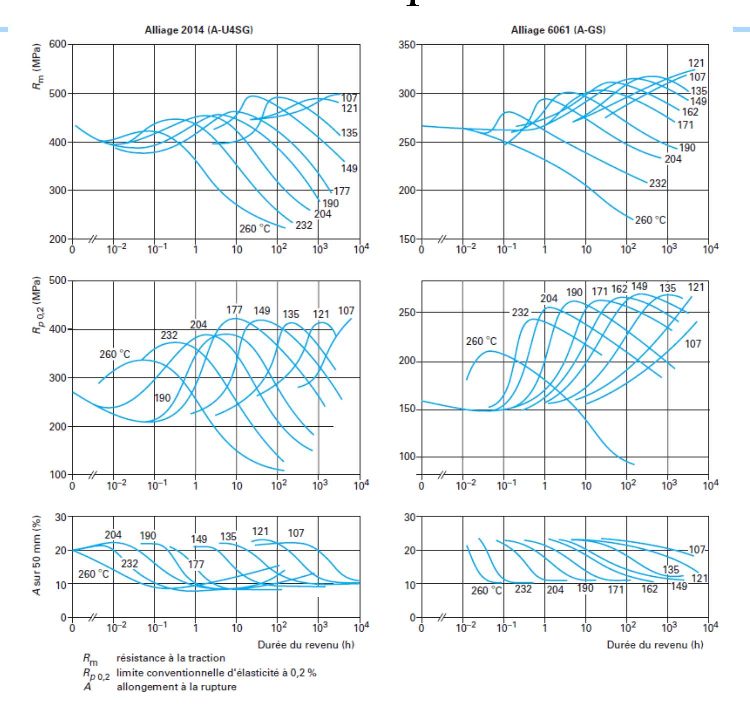
- Les zones GP et θ" forment des précipités cohérents (voir chapitre 3).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Effet du revenu sur les propriétés mécaniques

MEC-200



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

ÉTS
Le génie pour l'industrie

Durcissement par solution solide

MEC-200

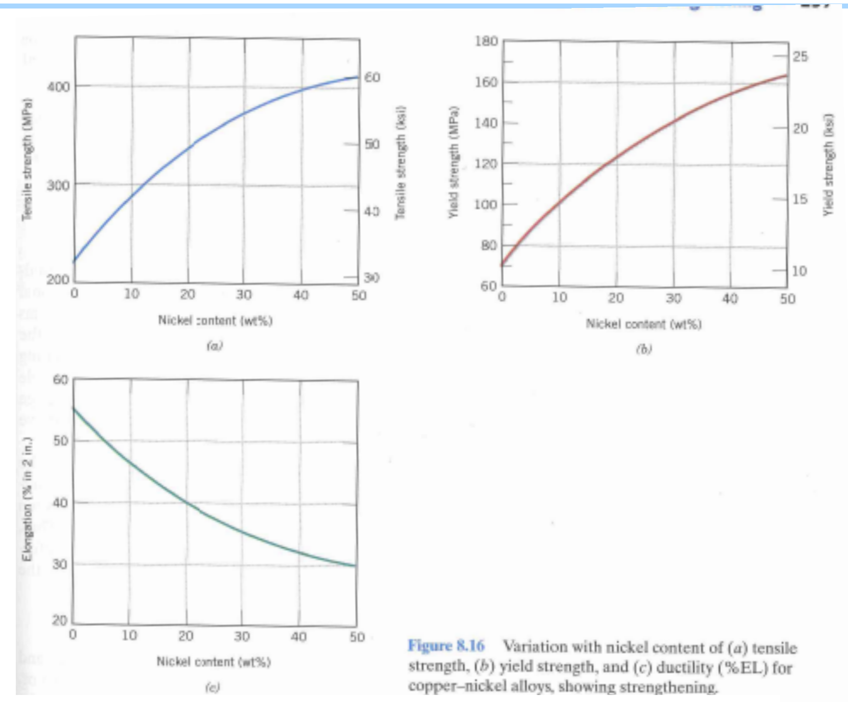


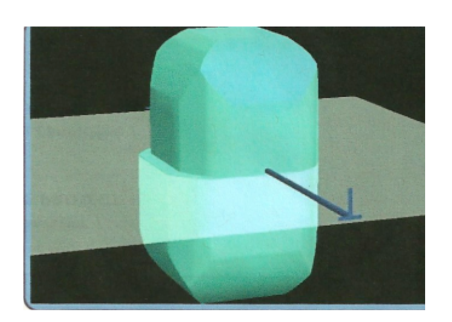
Figure 8.16 Variation with nickel content of (*a*) tensile strength, (*b*) yield strength, and (*c*) ductility (%EL) for copper–nickel alloys, showing strengthening.

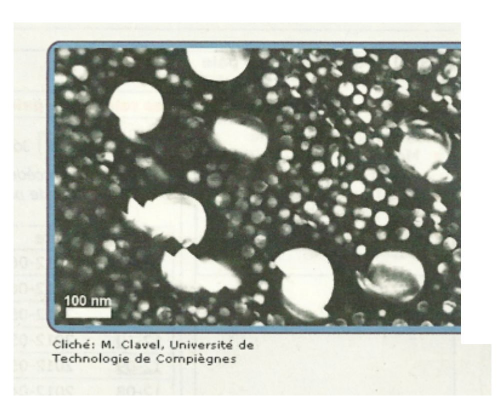
W.D. Calister et D.G Rethish; Fundamentals of materials Science and Engineering, 3rd edition, Wiley, 2007



MEC-200

Impact sur le mouvement des Dislocations – Précipités cohérents





Cliché: M. Clavel, Université de Technologie de Compiègnes

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Cisaillement d'un précipité cohérent

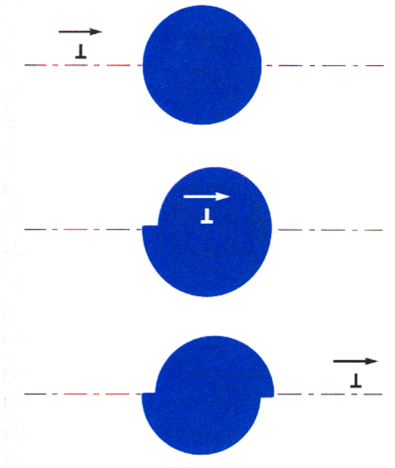
MEC-200

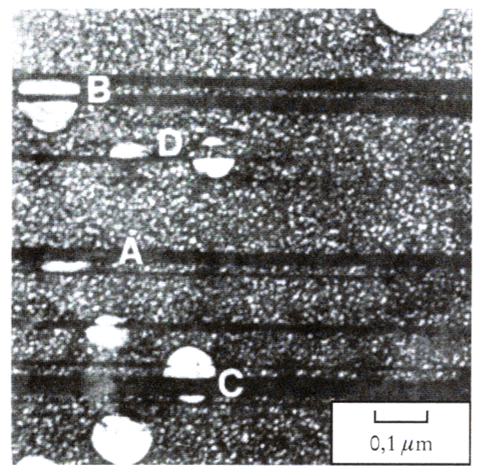
Avant la formation de précipités => les dislocations bougent de façon rectilignes.

On observe le même phénomène au début de vieillissement => les précipités cohérents sont cisaillés par le passage de la dislocation

Pourquoi ?

La distance entre les précipités étant très faible => les dislocation ne peuvent se courber car la cission t serait très grande => déplacement en coupant les précipités





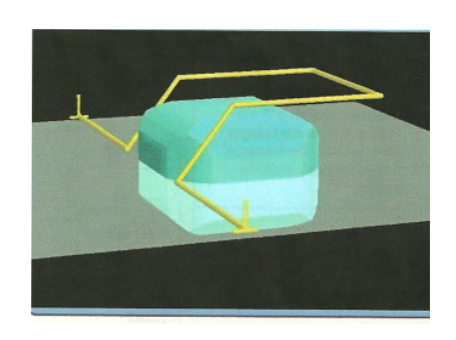


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Impact sur le mouvement des Dislocations précipités incohérents



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Impact sur le mouvement des dislocations

Mécanisme d'Orowan

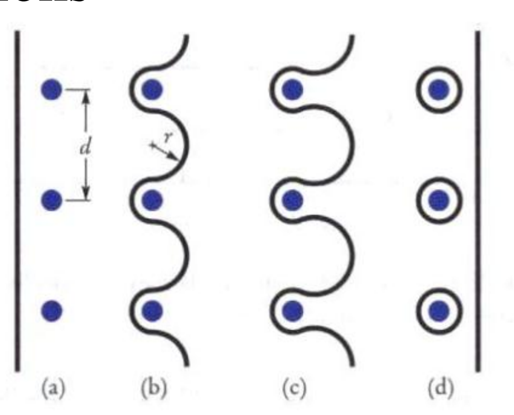
a) Chaque précipité est distant d'une distance d.

b-c) Pour franchir cette série d'obstacle, la dislocation doit se courber selon un rayon r=d/2. la contrainte pour courber la dislocation :

$$\tau = \frac{2Gb}{d}$$

b : vecteur de Burgers
G : module de cisaillement
d : distance moyenne entre les précipités

d) Des boucles de dislocations se forment alors autour des précipités.



Remarques:

- La cission τ est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les précipités.

- Le degré de durcissement dépend de :
- *cohérence des précipités,*
- *leur taille,*
- *leur distribution.*

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Impact sur le mouvement des dislocations

Exemple

Calcul de la cission nécessaire au déplacement des dislocations dans un alliage Al-4.5%Cu vieilli dans 2 conditions (G = 25GPa et b = 0.2 nm)

a) Quand le temps de vieillissement est important => formation de précipités d'équilibre ($CuAl_2$) avec d = 0.5 µm (= sur vieillissement).

$$\tau = \frac{2*25000*0.2*10^{-6}}{0.5*10^{-3}} = 20MPa$$

b) Quand le temps de vieillissement permet l'obtention de précipités θ'' avec d = 20 nm (dureté max).

$$\tau = \frac{2*25000*0.2*10^{-6}}{20*10^{-3}} = 500MPa$$



Diagramme d'équilibre Al-Cu

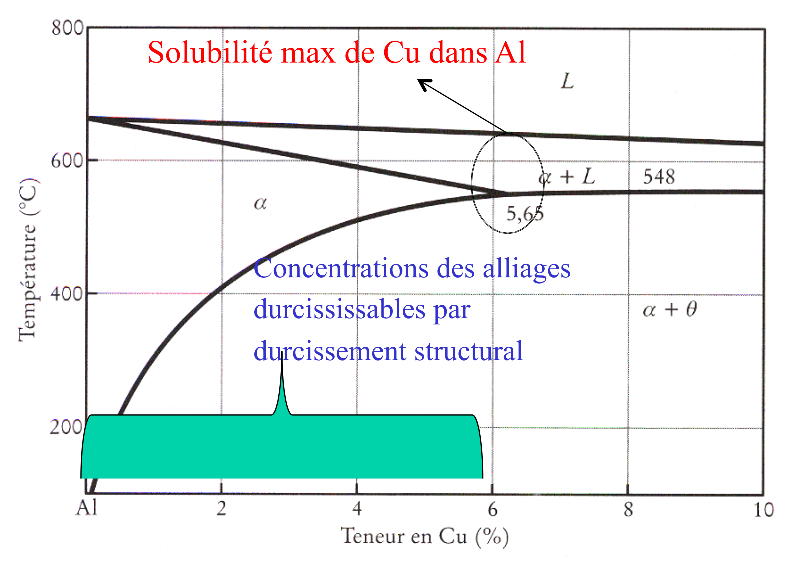


Figure 6.9 Partie du diagramme d'équilibre Al–Cu.

Alliages propices :

Al-Cu;
Al-Mg;
Al-Zn;
Al-Mg-Si;
Cu-Be;
Cu-Sn.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Les alliages d'aluminium

Tous les alliages d'aluminium ne se prêtent pas au durcissement structural : les alliages d'aluminium dits « trempants »

Série 2000 (Al-Cu)
Série 6000 (Al-Si-Mg)
Série 7000 (Al-Zn)

Principes

- ***Mise en solution*** *(température où tout le cuivre est dissous - dans le cas de la série 2000)*
  - *Alliages moulés : 6 à 12h*
  - *Alliages corroyés : 1 h pour 10 mm d'épaisseur et 30 min de plus pour chaque 10 mm supplémentaires*
- ***Trempe***
  - *Eau froide*
  - *Eau chaude*
- ***Revenu***
  - *Entre 160°C et 200°C pendant 6 à 24 h (=> T6)*

Buts

Améliorer les propriétés mécaniques (R_e, R_m et dureté)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200

Exercice

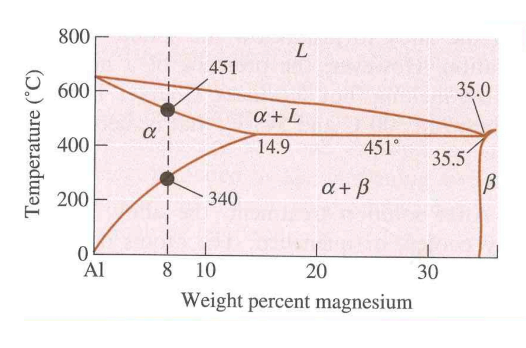


Figure 12-8 Portion of the aluminum-magnesium phase diagram.

Concevoir un traitement thermique pour un alliage de Mg à 8 %

Mise en solution a une température entre 340 et 451°C
Trempe à température ambiante pour éviter la formation de phase β
Revenu à une température plus petite que 340°C pour former phase β

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Exercice

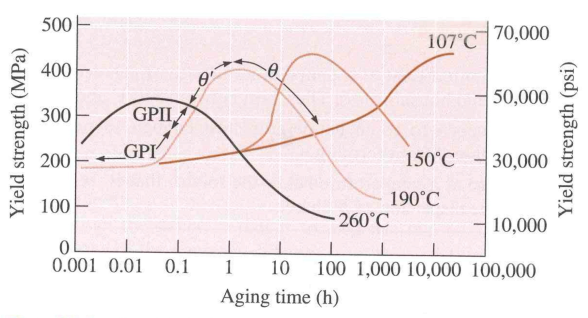


Figure 12-9 The effect of aging temperature and time on the yield strength of an Al-4% Cu alloy.

Un employé est parti déjeuner et a oublié un alliage d'al – 4% Cu dans le four utilisé pour traitement thermique.
Évaluer l' effet de laisser l' échantillon une heure de plus dans le four.

Tout dépendra de la température à laquelle était fait le traitement thermique.
A 190°C pas trop d' influence, à 260 par contre…

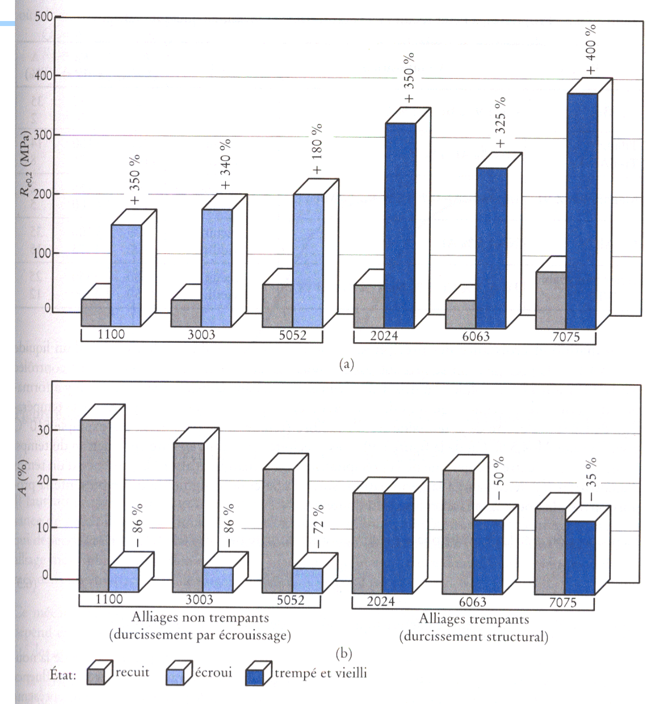
Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Comparaison des alliages d'aluminium

MEC-200

Série	Principaux éléments d'alliage	Durcissement structural
1000	Al > 99%	Non
2000	**Al-Cu**	**Oui**
3000	Al-Mn	Non
4000	Al-Si	Non
5000	Al-Mg	Non
6000	**Al-Mg-Si**	**Oui**
7000	**Al-Zn**	**Oui**



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Comparaison des propriétés des alliages : Etats recuit et vieilli

Alliages	Composition	État	$R_{e0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
Cu–Be	Cu–1,9 % Be–0,2 % Co	recuit vieilli	220 1050	475 1300	35 2
Titane Ti–6Al–4V	Ti–6 % Al–4 % V	recuit vieilli	220 1100	1100 1175	14 8
Magnésium Z.91	Mg–9 % Al–0,7 % Zn–0,2 % Mn	brut de fonderie vieilli	100 140	165 280	2 5
Ni–Al	Ni–4,5 % Al	recuit vieilli	420 900	700 1175	35 15
Acier inoxydable 17-7-Ti	Fe–1,7 % Cr–7 % Ni–1 % Ti–0,1 % C	recuit vieilli	600 1250	850 1400	25 12

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Identification de l'état d'un matériau

F : état brut de fabrication
O : état recuit et recristallisé
H : état écroui
- HIX : écrouissage seulement (le dernier chiffre, X, indique le degré d'écrouissage)
  - H11 : nuance la moins dure
  - H12 : nuance 1/4 dur
  - H14 : nuance 1/2 dur
  - H16 : nuance 3/4 dur
  - H18 : nuance 4/4 dur
  - H19 : nuance extra-dur
- H2X : écrouissage suivi d'un recuit de restauration (X varie de 2 à 9)
- H3X : écrouissage suivi d'une stabilisation (X varie de 2 à 9)

T : état durci par trempe et vieillissement (durcissement structural)
- T1 : trempe après mise en forme à chaud et vieillissement naturel (à la température ambiante)
- T3 : mise en solution, trempe, écrouissage et vieillissement naturel
- T4 : comme T3, mais sans écrouissage
- T5 : comme T1, mais vieillissement accéléré (à une température supérieure à la température ambiante)
- T6 : comme T4, mais vieillissement accéléré
- T7 : comme T6, mais survieilli
- T8 : comme T3, mais vieillissement accéléré
- T9 : comme T6 et suivi d'un écrouissage

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Facteurs influençant les propriétés d'un traitement thermique

- température de traitement,
- temps de maintien à la température de traitement,
- nuance (type d'alliage) du matériau,
- travaux effectués sur le matériau,
- nombre de cycles (nombre de traitements),
- mode de vieillissement :
  - Vitesse de refroidissement,
  - Type et température du milieu de trempe,
  - Agitation du milieu de trempe.



MEC-200

Qu'avons nous appris?

- Pour chaque alliage il peut exister un type de traitement pour le durcir. Ce traitement dépendra de la nature de l'alliage.
- Durcissement par solution solide: atomes intersticiels qui augmentent le durcissement, fonction du diamêtre de l'atome
- Durcissement par diminution de la taille des grains: relation de Hall-Petch
- Durcissement par écrouissage, travail à froid et traitement thermique
- Durcissement structurel, précipités cohérents et incohérents.
- Les traitements rendent les mouvements des dislocations plus difficiles.
- Les origines de chacun de ces types de durcissement